

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة سعيدة - د. الطاهر مولاي  
UNIVERSITÉ DESAÏDA- Dr MOULAY TAHAR  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil et d'Hydraulique



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **Diplôme de MASTER en Génie Civil**

Spécialité : Structures

Par : **GUERROUDJ Wassila**

---

### Étude de comportement thermo-mécanique des plaques FGM pour les applications enveloppe de bâtiment à énergie solaire.

---

Soutenu, devant le jury composé de :

M. DERRAS Boumediene	Professeur	U.Saida	Président
M. HACHEMI Houari	Maitre.C.B	U.Saida	Encadreur
M <sup>me</sup> BENGUEDIAB S.	Maitre.C.B	U.Saida	Examineur

**Année Universitaire :2019/2020**

## Remerciement

Ma gratitude s'adresse à Mr HACHEMI houari pour son encadrement, son orientation, ses conseils et sa disponibilité qu'il m' a témoignée pour me permettre de mener à bien ce travail.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury pour avoir examiné mon travail.

## Dédicace

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

## Table des matières (Sommaire)

Remerciement.....	
Dédicace.....	
Liste des tableaux.....	IV
Liste des figures.....	VII
Résumé.....	VIII
<b>Introduction générale.....</b>	<b>I-II</b>
<b>Chapitre I: Généralités Sur Les Matériaux A Gradient De Propriétés ( FGM ).....</b>	<b>2-23</b>
I.1.Introduction.....	2
I.2. Concept des matériaux fonctionnellement gradués.....	3
I.3. Histoire des FGM.....	5
I.4. Types de FGM.....	7
I.5. Méthodes d'élaboration des matériaux à gradient de propriétés.....	10
I.5.1. Processus en phase solide.....	10
I.5.1.1. Métallurgie des poudres (Powder Métallurgie PM ).....	10
I.5.2. Processus de dépôt.....	10
I.5.2.1. Technique de dépôt en phase vapeur (Vapeur Déposition Technique).....	10
I.5.2.2. Déposition par projection thermique.....	11
I.5.3. Processus en phase liquide.....	12
I.5.3.1. Coulée centrifuge (Centrifugat casting).....	12
I.5.3.2. Coulage en bande (Tape casting).....	12
I.5.3.3. Dépôt par électrophorèse.....	13
I.5.3.4. Coulage Séquentiel en barbotine (Slip casting).....	15
I.5.3.5. Dépôt laser.....	16
I.5.3.6. Sédimentation.....	17
I.6. Domaine d'application.....	18
I.7. Lois régissant la variation des propriétés matérielles des plaques FGM.....	19
I.7.1. Propriétés matérielles de la plaque P-FGM.....	20

---

I.7.2. Propriétés matérielles de la plaque S-FGM.....	21
I.7.3. Les propriétés matérielles de la poutre E-FGM.....	22
I.7.4. Le modèle d'homogénéisation de Mori Tanaka.....	22
I.8. Conclusion.....	23
<b>Chapitre II: Fabrication des FGM's (Al-HDPE) par sédimentation.....</b>	<b>25-36</b>
1. Introduction.....	25
2. Les FGM 's dans les domaines des panneaux solaire.....	25
2.1. Centrales photovoltaïques.....	25
2.2. BIPV(Building-integrated photovoltaic ) conventional.....	26
2.3. BIPV hybrid.....	26
3. Avantages BIPV conventional.....	27
4. Fabrication des FGM a base aluminium / polyéthylène haute densité.....	30
4.1. Solidification du panneau FGM.....	31
5. Caractérisation expérimentale de la plaque FGM.....	31
6. Conclusion.....	36
<b>Chapitre III: Modélisation d'une plaque FGM (Al-HDPE) par ANSYS (ADPL).....</b>	<b>38-57</b>
1. Introduction.....	38
2. Présentation Générale d'Ansys.....	38
3. Organisation du calcul utilisant la théorie des éléments finis .....	39
3.1.Choix de la géométrie et du maillage .....	39
3.2. Définition du modèle mathématique (données caractérisant le modèle) .....	39
3.3. Résolution du problème discrétisé .....	39
3.4.Analyse et post-traitement des résultats .....	39
4. Propriétés thermo-mécaniques des matériaux .....	40
5. Chargements thermo-mécaniques.....	40
6. Types d'analyse thermique.....	41
6.1. Convection.....	42
6.2. Radiation.....	43
6.3. Effets spéciaux.....	43

---

6.4. Éléments de champ lointain.....	43
7. Structure de base du programme.....	43
7.1. Préprocesseur.....	44
7.2. Processeur de solution.....	45
7.3. Post-processeur.....	46
8. Modélisation Thermo-mécanique de la plaque FGM.....	46
8.1. Description de l'élément solide thermique (SOLID278).....	47
8.2. Les Dimensions et le Maillage.....	48
8.3. Material Models.....	49
8.4. Conditions aux limites et chargement.....	56
9. Conclusion.....	57
<b>Chapitre IV : Résultats et discussions.....</b>	<b>59-70</b>
1. Introduction.....	59
2. Résultats.....	59
2.1. Analyse Statique.....	59
2.2. Analyse Thermomécanique.....	64
3. Conclusion.....	70
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>72</b>
Références Bibliographiques.....	74

## Liste des figures

Figure I.1:Schéma de la microstructure à gradation continue avec des constituants en métal-céramique (a) Microstructure à gradation progressive (b) Vue agrandie et (c) FGM en céramique-métal.....	3
FigureI.2: représentation schématique de la fonction matérielle dans les différentes structures; (a) matériau homogène, (b) composite, (c) FGM.....	4
FigureI.3: Illustration des caractéristiques thermiques entre les composites CLC et FGM.....	5
Figure I.4: Le nombre annuel de publications sur le sujet des FGM fournies par le moteur de recherche de Scopus.....	6
Figure I.5: Classification des matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle.....	7
Figure I.6: Schéma de principe du concept de gradation des matériaux.....	8
Figure I.7: Les trois types de matériaux à gradient de propriétés et leurs applications.....	8
Figure I.8: Différents types des matériaux à gradients de propriétés : a) type gradient de fraction, b) type à gradient de forme, c) type à gradient d'orientation et d) à gradient de taille.....	9
Figure I-9 : Schéma de principe de la projection thermique par flamme.....	11
Figure I.10. Illustration schématique montrant le processus de la méthode centrifuge.....	12
Figure I.11 : Dispositif de coulage en bande.....	13
Figure I.12: Représentation schématique de la technique de dépôt par électrophorèse.....	14
Figure I.13 : Vue d'ensemble générale de la configuration EPD.....	14
Figure I.14 : Volume de la suspension circulante comme une fonction au temps durant le processus FGM.....	15
Figure I.15: Illustration du processus de coulée en barbotine.....	16
Figure I.16: Processus de base de dépôt au laser.....	16
Figure I.17 : Schéma de principe de la sédimentation.....	17
Figure I.18: Les principaux domaines d'application des FGM.....	18
Figure I.19 : Géométrie d'une plaque en FGM.....	19
Figure I.20 : Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM.....	20
Figure I.21: Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM.....	21
Figure I.22 : Variation du module de Young dans une plaque E-FGM.....	22
Figure I.23 : Distribution de module de Young à travers l'épaisseur de MT-FGMs.....	23
Figure II.1: Illustration schématique du panneau de toiture solaire hybride.....	27
Figure II.2: Les couches d'un panneau de toiture photovoltaïque-thermique intégré au bâtiment (BIPVT).....	28

Figure II.3: Coupe transversale du système résidentiel.....	29
Figure II.4: SEM observation de (a) aluminium (Al-111); et (b) de la poudre de polyéthylène haute densité.....	31
Figure II.5: Microstructure du panneau FGM contenant des particules d'aluminium dispersées dans la matrice HDPE, la concentration changeant dans le sens de l'épaisseur.....	32
Figure II.6: Variation du Module de Young du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.....	33
Figure II.7: Variation du coefficient de poisson du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.....	33
Figure II.8: Variation de la densité du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.....	34
Figure II.9: Variation de la diffusivité du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.....	34
Figure II.10: Variation de la conductivité du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDP .....	35
Figure II.11: Variation du coefficient de dilatation du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.....	35
Figure III-1 : L'interface utilisateur graphique (GUI) ANSYS.....	44
Figure III-2 : Choix de la préférence (étude) thermique.....	46
Figure III-3 : Définir le type d'élément SOLID278.....	47
Figure III-4 : Géométrie de l'élément solide thermique homogène SOLID278.....	48
Figure III-5 : plaque FGM carrée.....	49
Figure III-6: Détails de la division de l'épaisseur de la plaque.....	49
Figure III-7 : Spécifier l'unité de la température.....	50
Figure III-8 : Définir le modèle de comportement des matériaux et les valeurs.....	50
Figure III-9 : Caractéristiques mécaniques et thermiques suivant l'épaisseur du FGM.....	51
Figure III-10 : Valeurs appliquées sur les surface supérieure et inférieure de la plaque.....	52
Figure III-11 :Le Transfer de type d'élément ce fait après avoir terminer l'étape de l'étude thermique, de l'élément SOLID278 à l'élément SOLID185 pour l'étude structurel comme il est expliqué dans la figure III-12et III-13. ....	53
Figure III-12 :Transfer du type d'élément du thermique au structurel.....	54
Figure III-13: géométrie de l'élément solid185.....	54
Figure III-14:Choix de la préférence du calcul structurel.....	55
Figure III-15 :Type d'élément pour l'étude structurel.....	55
Figure III-16 :Conditions aux limites de plaque FGM.....	56
Figure III-17 : Déformation de flexion suivant l'axe UZ.....	57



Figure IV-1: Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM (axb), sous une charge réparties P=100Pa.....	59
Figure IV-2: Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM (2axb), sous une charge réparties P=100Pa.....	60
Figure IV-3: Courbe déflexion chargement pour une analyse statique.....	60
Figure IV-4: Déplacement suivant l'axe UX d'une plaque FGM (axb), sous une charge répartie ...	61
Figure IV-5: Déplacement suivant l'axe UX d'une plaque FGM (2xb), sous une charge réparties P=100Pa.....	61
Figure IV-6 : Courbe déplacement UX chargement pour une analyse statique.....	62
Figure IV-7 : Déplacement suivant l'axe UY d'une plaque FGM (axb), sous chargement réparties P=100Pa.....	62
Figure IV-8: Déplacement suivant l'axe UY d'une plaque FGM (2axb), sous une charge réparties P=100Pa.....	63
Figure IV-9: Courbe déplacement UY chargement pour une analyse statique.....	63
Figure IV-10: Température nodale pour 40C° .....	64
Figure IV-11 : Température nodale pour 60 C° .....	64
Figure IV-12 : Température nodale pour 80C° .....	65
Figure IV-10 : Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM (axb), sous une température 40C° et une charge réparties P=100Pa.....	65
Figure IV-11: Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM (2axb), sous une température 40C° et une charge répartie P=100Pa.....	66
Figure IV-12 : Courbe déflexion chargement sous une température de (40-60-80C°) pour une analyse thermomécanique.....	66
Figure IV-13 : Courbe déplacement UX chargement à 40C° .....	67
Figure IV-14 : Courbe déplacement UX chargement à 60C° .....	68
Figure IV-15 : Courbe déplacement UX chargement à 80C° .....	68
Figure IV-16: Courbe déplacement UY chargement à 40C° .....	69
Figure IV-17 : Courbe déplacement UY chargement à 60C° .....	69
Figure IV-18 : Courbe déplacement UY chargement à 80 C° .....	70

## Liste des tableaux

Tableau III-1: Unités SI des propriétés thermo-mécaniques des matériaux.....	40
Tableau IV-1: Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM (2axb) pour une analyse thermomécanique.....	67

## Liste des notations

$E(z)$	Module de Young en fonction de « z ».
$E$	Module de Young.
$E_1$	Module de Young de la surface inférieure.
$E_2$	Module de Young de la surface supérieure.
$\nu(z)$	Coefficient de Poisson en fonction de « z ».
$\nu$	Coefficient de Poisson.
$k$	Paramètre du matériau.
$h$	Epaisseur de la plaque.
$E_m$	Module de Young du métal.
$E_c$	Module de Young de céramique.
$P$	La propriété matérielle effective.
$P_m$	La propriété des faces supérieure.
$P_c$	La propriété des faces inférieure.
$k$	Fraction volumique.
$V_c$	Fraction volumique de la céramique.
$(\phi)$	Fraction volumique de l'aluminium par rapport au PEHD.
$\rho$	La densité.
$\alpha$	La diffusivité.
$\lambda$	Conductivité thermique.
$\beta$	La dilatation.
$a$	Longueur de la plaque.
$b$	Largeur de la plaque.

## الملخص

تُستخدم مواد التدرج للخصائص الوظيفية المصنوعة من الألمنيوم / البولي إيثيلين عالي الكثافة كمكون أساسي في غلاف المبنى متعدد الوظائف لكفاءة الطاقة والاستدامة. نظرًا لتغير الطور التدريجي للألمنيوم والبولي إيثيلين عالي الكثافة في اتجاه السماكة ، عندما تتعرض لوحة التدرج ذات الخصائص الوظيفية ذاتية الدعم لتغير درجة الحرارة ، فإنها ستظهر تشوهًا في الانحناء ، وهذا الأمر الذي سيعقد تجميع لوحة التدرج للخصائص الوظيفية في لوح شمسي للتسقيف مسطحة متعددة الوظائف. لذلك ، من الأهمية بمكان التنبؤ بالسلوك الحراري الميكانيكي للوحة تدرج الخصائص الوظيفية. تحقيقًا لهذه الغاية ، تم إجراء النمذجة بواسطة برنامج ANSYS في هذه الدراسة لصفحة متدرجة للخصائص الوظيفية تخضع لحمل ميكانيكي حراري مطبق خارجيًا.

**الكلمات المفتاحية:** مواد متدرجة للخصائص الوظيفية ، لوح شمسي للتسقيف مسطحة متعددة الوظائف ، سلوك ميكانيكي حراري

## Résumé

Les matériaux à gradient de propriétés fonctionnelles (FGM) en aluminium / polyéthylène haute densité (PEHD) sont utilisés en tant que composant essentiel d'une enveloppe de bâtiment multifonctionnelle pour l'efficacité énergétique et la durabilité. En raison du changement de phase progressif de l'aluminium et du PEHD dans le sens de l'épaisseur, lorsqu'un panneau FGM autoportant est soumis à une variation de température, il présentera une déformation de courbure, ce qui compliquera l'assemblage du panneau FGM dans un panneau solaire de toiture multifonctionnel plat. Par conséquent, il est crucial de prédire le comportement thermomécanique du panneau FGM. À cette fin, la modélisation par le logiciel ANSYS est réalisée dans cette étude pour une plaque FGM soumise à une charge thermomécanique appliquée de l'extérieur.

**Mots clés :** Les matériaux à gradient de propriétés fonctionnelles, panneau solaire de toiture multifonctionnel plat, comportement thermomécanique

## Abstract

Functional Property Gradient (FGM) materials made of aluminum / high-density polyethylene (HDPE) are used as an essential component of a multi-functional building envelope for energy efficiency and durability. Due to the gradual phase change of aluminum and HDPE in the thickness direction, when a self-supporting FGM panel is subjected to temperature variation, it will exhibit curvature deformation, which will complicate the assembly of the FGM panel into a solar flat multifunctional roof panel. Therefore, it is crucial to predict the thermomechanical behaviour of the FGM panel. To this end, modeling using ANSYS software is performed in this study for an FGM panel subjected to a thermomechanical load applied for the outside.

**Keywords :** Functional Property Gradient, solar flat multifunctional roof panel, thermomechanical behaviour

**Introduction**

**Générale**

## Introduction Générale

Les matériaux composites stratifiés conventionnels présentent une discontinuité des propriétés des matériaux à l'interface, ce qui entraîne généralement des concentrations de contraintes et donc des dommages sous forme de délaminage, de fissuration de la matrice et de séparation de la liaison adhésive lorsqu'ils sont soumis à des charges environnementales et mécaniques. Cependant, les matériaux à gradient de propriétés fonctionnelles (FGM: **F**unctionally **G**raded **M**aterials) possèdent des propriétés de matériau à gradation continue telles que des paramètres mécaniques, électriques et thermiques au niveau macro qui ne sont généralement pas fondés sur les matériaux conventionnels. Par conséquent, les MGF ont attiré beaucoup d'attention en tant que matériaux de structure avancés ces dernières années et ont été largement utilisées dans de nombreuses applications telles que l'aérospatiale, l'électrotechnique, le génie biomédical, le nucléaire et le génie civil

En raison du changement de phase progressif de l'aluminium et du HDPE dans le sens de l'épaisseur, le coefficient de dilatation thermique du FGM varie dans le sens de l'épaisseur. Une déformation de courbure considérable a été trouvée dans le produit final du panneau FGM conçu lorsqu'il a été refroidi à partir de la température de traitement plus élevée (140 ° C). Une déformation supplémentaire peut également exister dans les applications sur le terrain en raison d'une variation considérable des températures de service. En ce sens, l'intégrité structurelle du panneau BIPVT repose de manière significative sur la déformation thermique de la couche FGM. Le but de la couche FGM proposée est de créer une couche légère de panneau de toiture solaire avec une conductivité thermique variable dans le sens de l'épaisseur. Pour résoudre ce problème, il faut prédire avec précision les performances thermos-mécaniques du panneau FGM conçu à des fins de conception pour garantir l'intégrité du panneau BIPVT assemblé.

Le calcul des structures complexes nécessite de mettre en place des outils de modélisation du comportement mécanique de plus en plus sophistiqués, et prenant en compte les spécifications de ces matériaux-structures. Du point de vue pratique, les méthodes numériques, notamment le calcul par la méthode des éléments finis est indispensable pour le dimensionnement et la vérification des structures complexes.



Les travaux réalisés dans ce mémoire, s'inscrivent dans cette thématique L'étude du Étude de comportement thermomécanique des plaques FGM pour les applications enveloppe de bâtiment à énergie solaire. . L'objectif fondamental de ce travail est de modéliser le comportement à la flexion des plaques FGM à base de la poudre d'aluminium (Al) et de la poudre de polyéthylène haute densité (HDPE) , en utilisant la méthode des éléments finis sous le code ANSYS , ayant pour but de calculer les déflexions et les déplacement transversaux en flexion d'une plaques simplement appuyer sur les quatre bords par une analyse thermomécanique.

Le mémoire débute par une introduction générale qui s'articule ensuite autour de quatre chapitres et s'achève par une conclusion générale et des perspectives:

Dans **le premier chapitre**, nous présentons une rapide revue sur les matériaux à gradient de propriétés, leurs historiques, leurs évolutions et les domaines d'utilisation, ensuite une synthèse bibliographique donne un aperçu général des méthodes de la détermination de leurs caractéristiques mécaniques, basant sur les aspects fondamentaux du comportement des matériaux hétérogènes

**Le second chapitre** concerne la fabrication des FGM à base (Al-HDPE) pour les photovoltaïques intégrés aux bâtiments (BIPV), et leurs caractéristiques physiques et mécaniques.

**Le troisième chapitre** est réservé à la modélisation de la plaque FGM par le logiciel éléments finis ANSYS (APDL) par une analyse thermomécanique .

**Le chapitre quatre** est réservé à présentation et discussions des résultats réaliser pour une analyse statique et une analyse thermomécanique avec différents paramètres .

# **CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES MATERIAUX A GRADIENT DE PROPRIETES (FGM)**

# **CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES MATERIAUX A GRADIENT DE PROPRIETES ( FGM )**

## **I.1.Introduction**

Depuis l'âge du bronze» vers 4000 avant JC ou l'humanité a découvert le bronze; qui est un alliage entre le cuivre et l'étain et jusqu'à nos jours les matériaux et les métaux purs sont de moins à moins utiliser dans les applications d'ingénierie en raison de la demande d'exigences de propriété contradictoires avec la seule raison d'améliorer les propriétés du matériau. L'alliage traditionnel est limité dans le cas de deux matériaux différents avec des températures de fusion très éloignées; il devient prohibitif de combiner ces matériaux par ce processus.

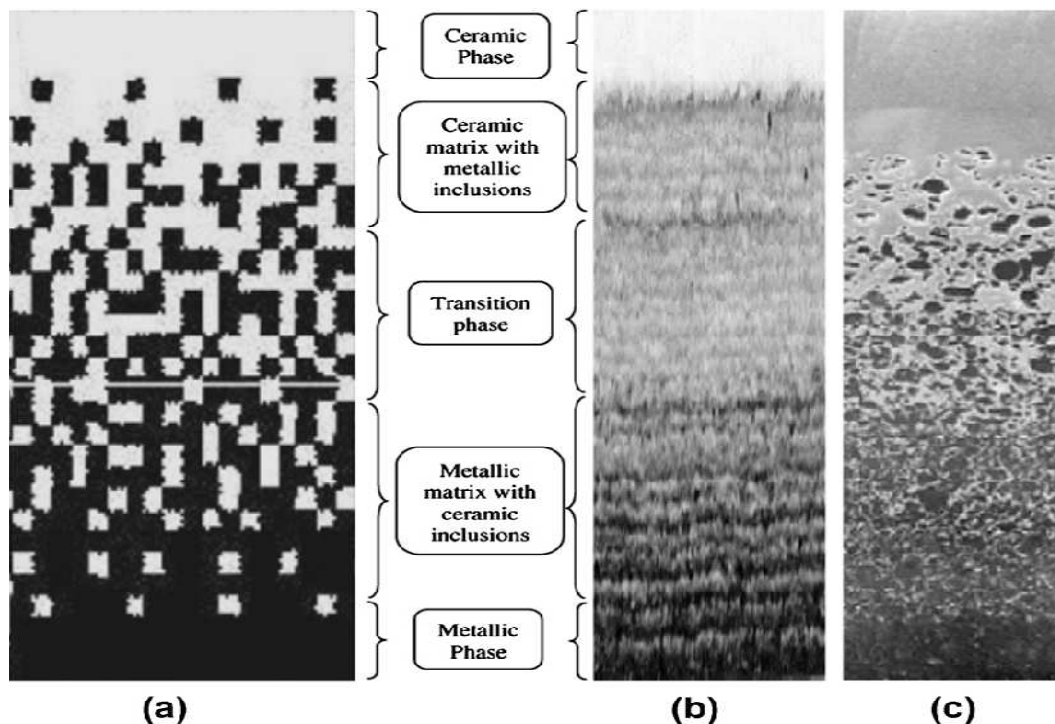
Le développement des matériaux composites a permis de leurs associer des propriétés spécifiques au sein d'une même pièce, alors ils sont une classe de matériaux avancés, composés d'un ou de plusieurs matériaux combinés dans des états solides ayant des propriétés physiques et chimiques distinctes. Les matériaux composites s'endommagent dans des conditions de travail extrêmes (haute température ) par un processus appelé décollement (séparation des fibres de la matrice).

Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont élaborés un nouveau matériau appelé matériau à gradient de propriétés fonctionnelles (en anglais : **F**unctionally **G**raded **M**aterials "FGM"), ces matériaux s'inscrivent dans une tendance relativement nouvelle de la science des matériaux. Ce sont des matériaux composites sophistiqués dans lesquels la composition et la structure se modifient graduellement en fonction du volume, le module d'élasticité de cisaillement et la densité de matériau, varient en douceur et en continu dans les directions préférées, générant ainsi des changements en conséquence au niveau des propriétés des matériaux, les FGMs les plus courants allient la dureté et l'usinabilité du métal à la résistance à la chaleur, à l'usure et à l'oxydation des céramiques.

### I.2. Concept des matériaux fonctionnellement gradués

Le matériau à gradient de propriétés (FGM) est un nouveau concept pour la réalisation de propriétés et / ou de fonctions innovantes qui ne peuvent être obtenues avec des matériaux homogènes conventionnels. Dans sa structure la plus simple, il se compose d'un matériau d'un côté et de l'autre d'un second matériau, et une couche intermédiaire dont la structure, la composition et la morphologie varient doucement d'un matériau à l'autre de l'ordre du micron [1] voir (fig. I.1).

Le concept de "matériau à gradient de propriétés" se réfère clairement à la réalisation de propriétés innovantes suivies d'une inhomogénéité qui ne peut être réalisée par des matériaux conventionnels homogènes, en mettant l'accent sur les deux caractéristiques essentielles suivantes. La première caractéristique essentielle consiste à adapter artificiellement la composition chimique et la microstructure à partir de la prédiction quantitative du profil de distribution des propriétés pour obtenir la fonction souhaitée. La deuxième caractéristique essentielle inclut la disponibilité de processus de fabrication qui a une bonne reproductibilité, en tant que technologie avancée pour le gradient de propriétés. Les procédés doivent pouvoir produire un profil précis de la composition chimique et doivent pouvoir être directement fabriqués à partir des résultats des calculs effectués par les concepteurs de matériaux.

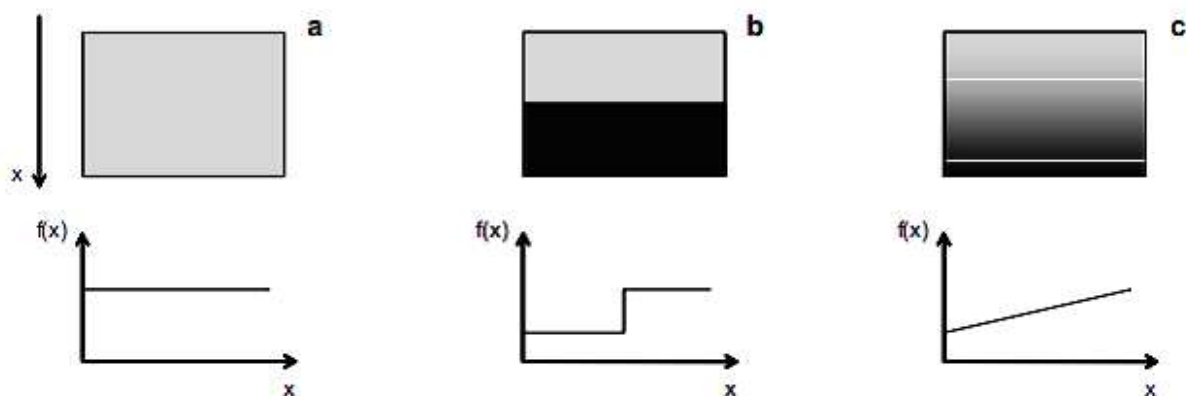


**Figure I.1:**Schéma de la microstructure à gradation continue avec des constituants en métal-céramique (a) Microstructure à gradation progressive (b) Vue agrandie et (c) FGM en céramique-métal [2].

Le matériau à gradation de propriétés fonctionnelle (FGM) c'est un matériau révolutionnaire qui appartient à une classe de matériaux avancés avec des propriétés variables sur une dimension changeante [3].

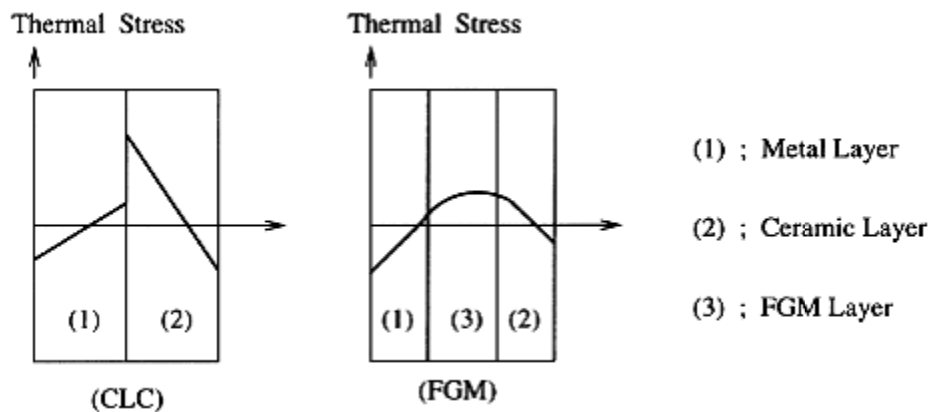
La variation des propriétés en douceur d'un matériau à l'autre dans les FGMs élimine les interfaces pointues existant dans les matériaux composites où les défaillances sont déclenchées [4]. Il remplace cette interface pointue par une interface dégradée qui produit une transition en douceur d'un matériau à l'autre [1]. L'une des caractéristiques uniques des FGM est la possibilité de personnaliser un matériau pour une application spécifique [5].

Les propriétés de tels matériaux peuvent être décrites par la fonction  $f(x)$ . Dans les matériaux homogènes, cette fonction est constante comme dans (Fig I.2.a). Dans le cas d'une jonction de deux fonctions matérielles différentes,  $f(x)$  a une forme de déformation (Fig I.2.b). Dans les FGM, cette fonction matérielle doit être continue ou quasi-continue [6].



**Figure I.2:** représentation schématique de la fonction matérielle dans les différentes structures;  
(a) matériau homogène, (b) composite, (c) FGM [6].

Au début du développement des matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle, le concept consistait à supprimer l'interface pointue (le saut dans les contraintes thermiques) qui existait dans le matériau composite traditionnel et à la remplacer par l'interface qui se modifiait progressivement, ce qui se traduisait par une modification de la composition chimique de ce composite. De l'illustration (Fig I.3), nous voyons que la FGM présente une distribution des contraintes thermique plus douce que celle des composites stratifiés classiques (CLC) [7].



**Figure I.3:** Illustration des caractéristiques thermiques entre les composites CLC et FGM [7].

Les principaux avantages de l'utilisation des FGM sont [8]:

1. la réduction des contraintes thermiques;
2. réduction des contraintes thermiques aux endroits critiques;
3. diminution des transitions de contrainte brusques à l'interface;
4. réduction du facteur d'intensité de contrainte (force motrice pour la propagation de fissure)
5. augmentation de la force de liaison interfaciale.

### I.3. Histoire des FGM

Avec le développement des nouvelles industries et de nouveaux processus modernes, de nombreuses structures servent dans des environnements thermiques, ce qui aboutit à une nouvelle classe de matériaux composites appelés matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle (FGM). Les FGMs ont été initialement conçues comme des matériaux de barrière thermique pour les applications structurelles aérospatiales et les réacteurs de fusion. Ils sont maintenant développés pour une utilisation générale en tant que composants structurels dans des environnements à très haute température.

Déjà en 1972, Bever et Duwez et Shen et Bever reconnaissaient l'utilité des composites à gradient de propriétés. Cependant, leur travail n'a eu qu'un impact limité, probablement dû au manque de méthodes de production adaptées aux FGMs à cette époque [9].

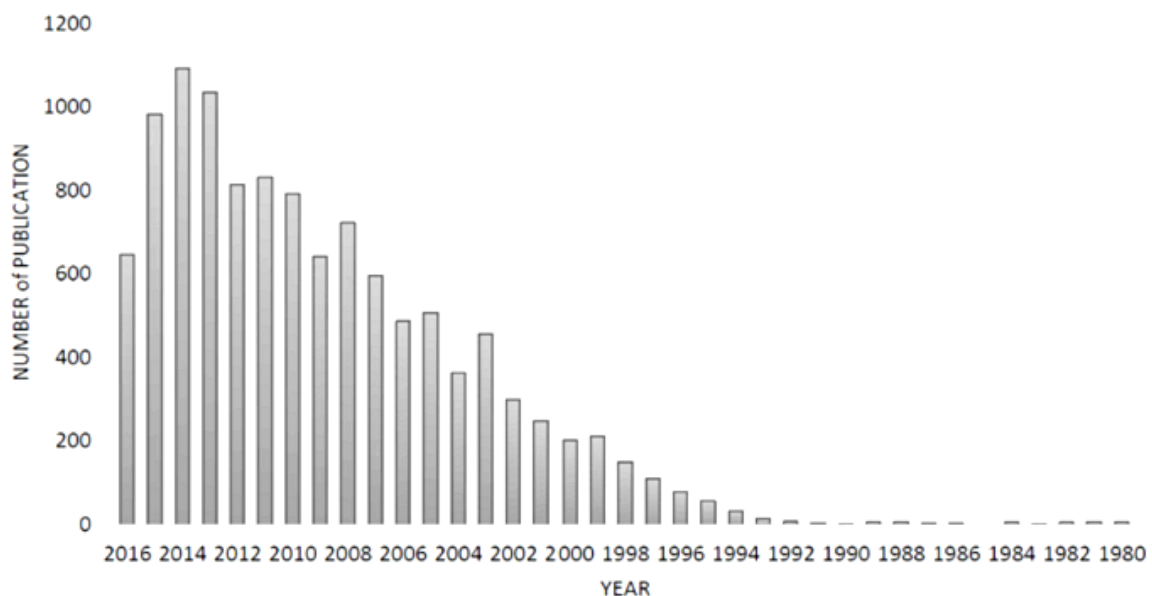
Il a fallu 15 ans de plus avant que des recherches systématiques sur les procédés de fabrication des matériaux à gradient de propriétés soient menées dans le cadre d'un programme national de recherche sur les FGM au Japon.

Le concept de matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle (FGM) a été développé au Japon par Niino en 1984 [10]. Ils ont été utilisés comme matériaux «super résistants» dans

les systèmes de propulsion et les revêtements de fuselage des engins spatiaux afin de réduire les contraintes thermiques générés et d'améliorer la résistivité thermique [11].

Cependant, le travail n'a été entrepris que plus tard. En 1987, un vaste projet national a été lancé au Japon, intitulé Recherche sur les technologies de base, développement de matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle, et relaxation des contraintes thermiques, visant à développer des matériaux résistants à la chaleur (haute température) pour le système de propulsion des navette spatial. Des efforts de recherche intensifs ont été consacrés au projet. En conséquence, le concept de FGM a été virtuellement montré et le terme FGM (matériau à gradient de propriétés) a été introduit pour la première fois plus précises en 1986 [12]. Le premier article sur la fabrication des FGMs a été publié en 1987. La publication des documents concernant les FGMs s'est considérablement développée après les deux colloques internationaux sur les FGMs (tenus à Sendai en 1990 et à San Francisco en 1992). Il y a également eu de petits projets de recherche sur les composites avec des fonctions similaires réalisées individuellement par des chercheurs du monde entier [13].

L'Atelier sur les matériaux à gradient de propriétés a été organisé en Allemagne en 1993, en mars 1994 un autre atelier sur les FGMs a eu lieu aux États-Unis. À l'heure actuelle, des colloques internationaux sur les MGFs se tiennent régulièrement dans le monde entier.



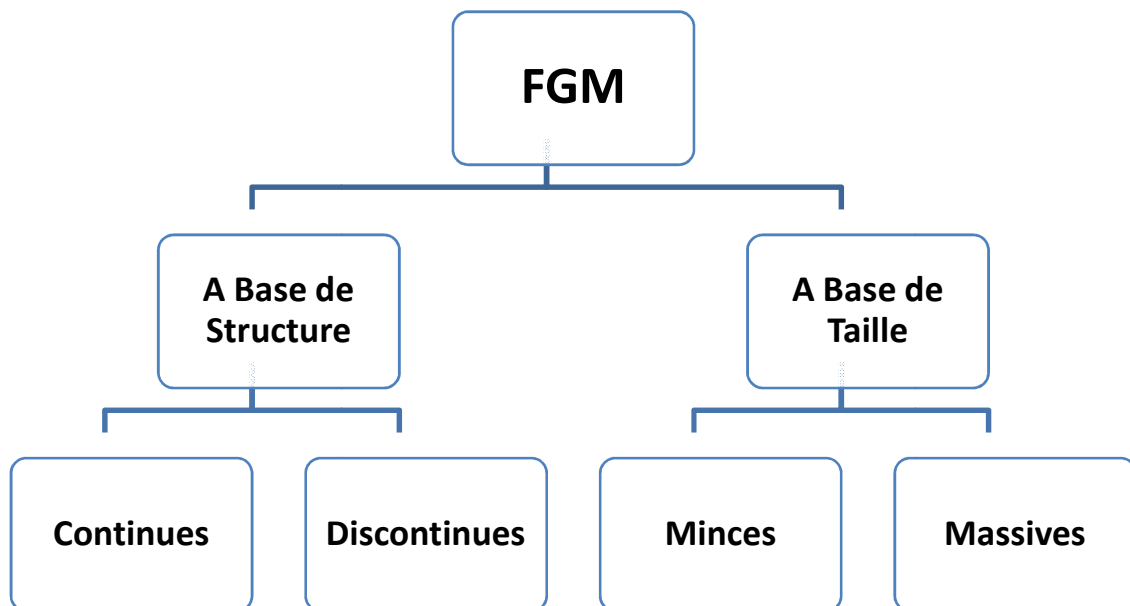
**Figure I.4:** Le nombre annuel de publications sur le sujet des FGM fournies par le moteur de recherche de Scopus [14].

L'intérêt pour les FGM a récemment augmenté en raison de la capacité à produire des matériaux avec des propriétés sur mesure qui sont des candidats appropriés pour de nombreuses applications de haute technologie telles que l'aérospatiale, le génie biologique et les industries nucléaires. À ce titre, le nombre de publications dans ce domaine de recherche a

augmenté de façon exponentielle au cours des 20 dernières années [14]. La figure I.4 illustre le nombre annuel de publications sur les FGM.

### I.4. Types de FGM:

Au début du développement des matériaux à gradient de propriétés, le concept consistait à supprimer l'interface pointue qui existait dans le matériau composite traditionnel et à la remplacer par l'interface qui se modifiait progressivement, ce qui se traduisait par une modification de la composition chimique de ce composite. A cet effet deux critères différents sont utilisés pour classer les matériaux fonctionnelle à gradient de propriétés. L'un est basé sur la structure du matériau et l'autre sur la taille des matériaux à gradient de propriétés de manière fonctionnelle. Comme le montre la figure I.4, les FGM peuvent être divisés en deux groupes principaux basés sur la structure des matériaux: FGM structurée en continue et structurée de manière discontinue. Dans les FGM continues, il existe un gradient continu d'un matériau à l'autre. Cependant, en cas de FGM discontinue, le gradient de matière est fourni en couches. En fonction de la taille des matériaux, les FGM sont classées en deux types principaux: les FGM minces et les FGM massive. Les FGM minces ont des sections relativement minces, comme les revêtements de surface, tandis que les FGM massive constituent un volume complet de matériaux.



**Figure I.5:** Classification des matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle

Il existe deux types de structures graduées qui peuvent être préparées dans le cas des FGM, à savoir la structure continue représentée sur la figure I.6 (a) et la structure par étapes (couches) représentée sur la figure I.6 (b) [15].



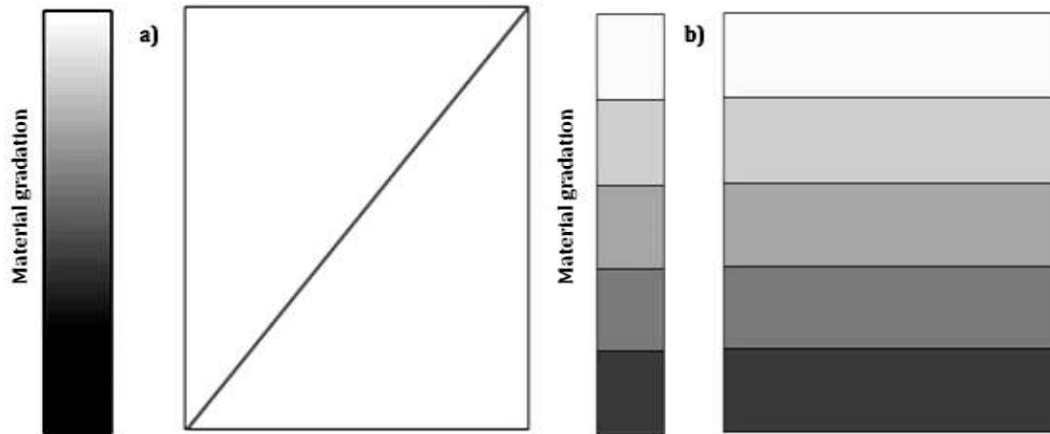


Figure I.6: Schéma de principe du concept de gradation des matériaux [15].

Dans le cas d'une structure à gradation continue, le changement de composition et de microstructure se produit continuellement avec la position. En revanche, dans le cas de structure à gradation pas à pas, la caractéristique de la microstructure évolue progressivement, donnant naissance à une structure multicouche avec une interface existant entre des couches discrètes.

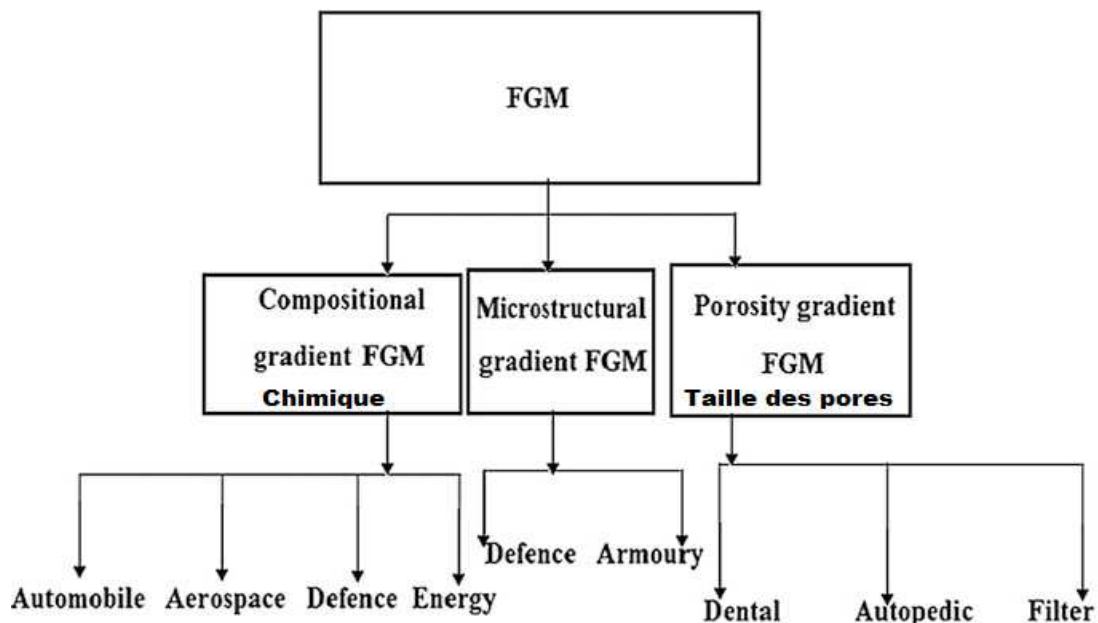


Figure I.7: Les trois types de matériaux à gradient de propriétés et leurs applications [16].

L'intérêt croissant pour ce type de matériau a entraîné la mise au point de différents types de FGM, le type d'application envisagée détermine généralement le type de FGM à utiliser.

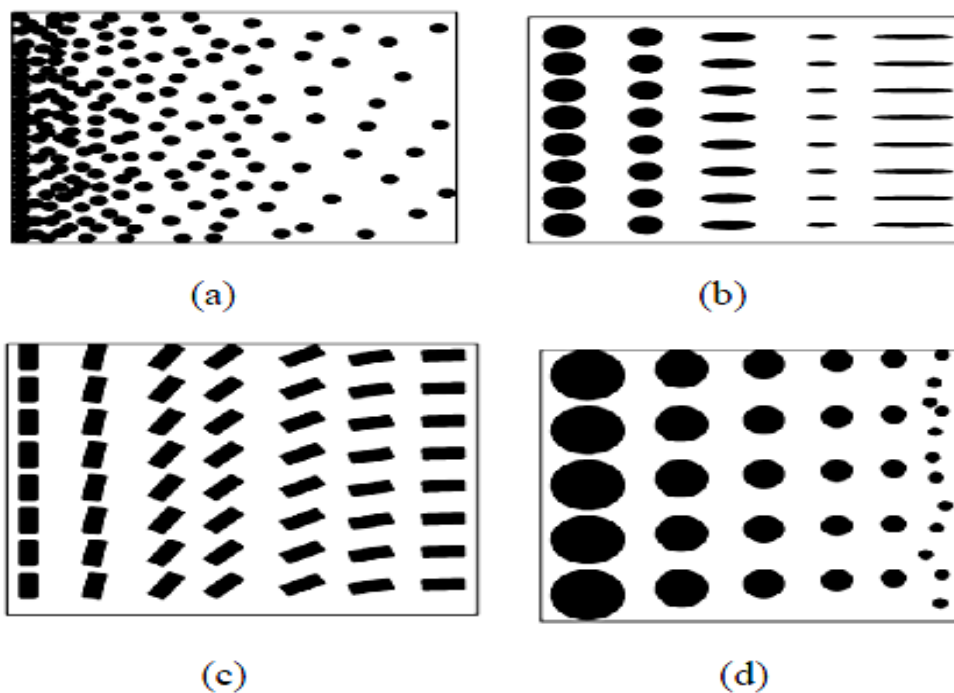
Les matériaux ayant une composition, une microstructure ou une porosité changeantes à travers le volume du matériau sont appelés matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle (FGM) [16].

Les différents types de FGM comprennent les FGM à structure de gradient de porosité et de taille des pores, les FGM à structure à gradient chimique (composition) et les FGM à structure à gradient microstructural (voir figure I.7).

Selon la nature du gradient, les FGM peuvent être regroupées en types suivants (voir Fig. I.8) [17].

- 1) Type de gradient de fractions (Fig.I.8a)
- 2) Type à gradient de forme (Fig. I.8b)
- 3) Type de gradient d'orientation (Fig. I.8c)
- 4) Type de gradient de taille (du matériau) (Fig. I.8d)

Selon le nombre de directions que les propriétés ont changé, nous pouvons distinguer les FGM à une dimension, à deux dimensions ou à trois dimensions



**Figure I.8:** Différents types des matériaux à gradients de propriétés : a) type gradient de fraction, b) type à gradient de forme, c) type à gradient d'orientation et d) à gradient de taille [17].

### **I.5. Méthodes d'élaboration des matériaux à gradient de propriétés:**

En résumé, la plupart des méthodes impliquées dans le processus de fabrication des matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle sont classées en trois parties [18]; [19]; [20]:

1) Processus à l'état solide.

2) Processus de dépôt .

3) Processus à l'état liquide.

Les matériaux à gradient de propriétés à faible épaisseur se présentent généralement sous la forme de revêtements de surface, il existe un large éventail de procédés de dépôt de surface à choisir en fonction des exigences de service et du procédé. Les FGM massive sont fabriquées en utilisant des méthodes telles que la métallurgie des poudres, le moulage par centrifugation et d'autres techniques de fabrication .

Plusieurs techniques sont disponibles pour produire des matériaux à gradient de propriétés (FGM). Peu d'entre eux sont décrits ci-dessous en détail.

#### **I.5.1. Processus en phase solide:**

##### **I.5.1.1. Métallurgie des poudres (Powder Metallurgy PM ):**

La technique de la métallurgie des poudres (PM) est utilisée pour produire des matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle FGM du type massive avec une structure discontinue (par couches) [21]. Le processus est réalisé en utilisant des étapes telles que le pesage et le mélange de la poudre selon la distribution spatiale préconçue selon les exigences fonctionnelles, l'empilement et le pilonnage des poudres prémélangées et enfin le frittage.

On appelle frittage le processus de liaison qui s'établit entre particules voisines lorsqu'une poudre ou un mélange de poudres compact est chauffé à haute température. Différentes techniques de frittage existent. Il est possible de distinguer deux grandes familles de techniques. La première est caractérisée par l'absence de pression mécanique, ce sont les techniques de frittage naturels. La seconde technique est quant à elle caractérisée par l'application d'une pression mécanique, uniaxiale ou isostatique, pendant le cycle de frittage (chauffage, palier et refroidissement). Ce sont les techniques de frittage sous charge.

#### **I.5.2. Processus de dépôt:**

##### **I.5.2.1. Technique de dépôt en phase vapeur (Vapour Deposition Technique):**

Les techniques de dépôt en phase vapeur décrivent une variété de méthodes de dépôt sous vide qui peuvent être utilisées pour produire des films minces sur les matériaux de base. Toutes ces techniques peuvent être utilisées uniquement pour produire des FGM minces. Différents types de techniques de dépôt en phase vapeur comprennent le dépôt physique en

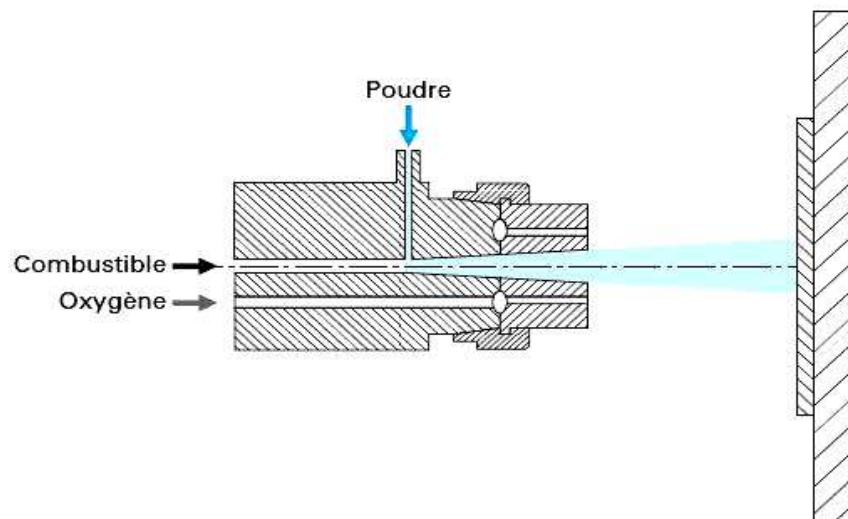
phase vapeur (PVD) et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD). Celles-ci consomment beaucoup d'énergie et produisent des gaz toxiques comme sous-produits [22]. Les autres techniques de dépôt pouvant déposer des revêtements à gradient fonctionnel mince sont le dépôt par faisceau d'électrons (EBD), le dépôt par faisceau d'ions (IBD) et la synthèse à haute température (SHS). Toutes les méthodes mentionnées ci-dessus ne sont pas rentables pour produire des FGM de type massive (épaisse). Les épaisseurs des FGMs fabriqués par ces techniques de projection ou de déposition sont inférieures à 0,5 mm.

le CVD était considéré comme l'un des procédés les plus attrayants pour la fabrication de semi-conducteurs et était de plus en plus utilisé pour le revêtement de circuits électroniques. Plus tard, la technique CVD a été progressivement adoptée pour la fabrication des céramiques avancées, et des cellules solaires [23].

### I.5.2.2. Déposition par projection thermique:

La projection thermique est une technique par laquelle une structure est recouverte de matériaux fondus par pulvérisation, les matériaux fondus seront les matériaux à gradient de propriétés qui forme les couches de revêtement.

Le dépôt par projection thermique se décline en quatre techniques différentes : la projection par flamme, la projection par arc électrique, la projection par plasma (VPS) et la projection thermique à froid. Pour l'ensemble de ces techniques, la fabrication du FGM tient au contrôle de la distribution de la poudre dans la buse de projection thermique.



**Figure I-9** : Schéma de principe de la projection thermique par flamme [24].

En fonction de la méthode utilisée pour la projection thermique, on utilise diverses températures de gaz de 12 000 à 16 000 ° C pour une pulvérisation au plasma contre 3 000 ° C

pour une pulvérisation de poudre et HVOF (l'oxygène à haute vitesse) et 4 000 ° C pour une pulvérisation de fil électrique [25].

Un des avantages de l'utilisation de cette technique est que le revêtement fournit est épais (20  $\mu\text{m}$  à mm) sur une grande surface à une vitesse de dépôt élevée meilleure que les autres procédés de revêtement tels que l'électro déposition et le dépôt en phase vapeur.

### I.5.3. Processus en phase liquide:

#### I.5.3.1. Coulée centrifuge (Centrifugal casting):

La méthode centrifuge est capable de produire des FGM de type massive structurées en continu. Il utilise la force de gravité à travers le filage de la moisissure pour produire des matériaux à gradient de propriétés [26]. La différence de densité de matière et la rotation du moule produisent des FGM. Cette méthode présente deux inconvénients: cette méthode ne peut produire que des FGM de forme cylindrique et le type de gradient pouvant être produit est limité à cause de la difficulté à assurer la parfaite maîtrise ou le contrôle du mouvement des grains de poudre au sein du milieu visqueux qui constitue le bain métallique fondu.

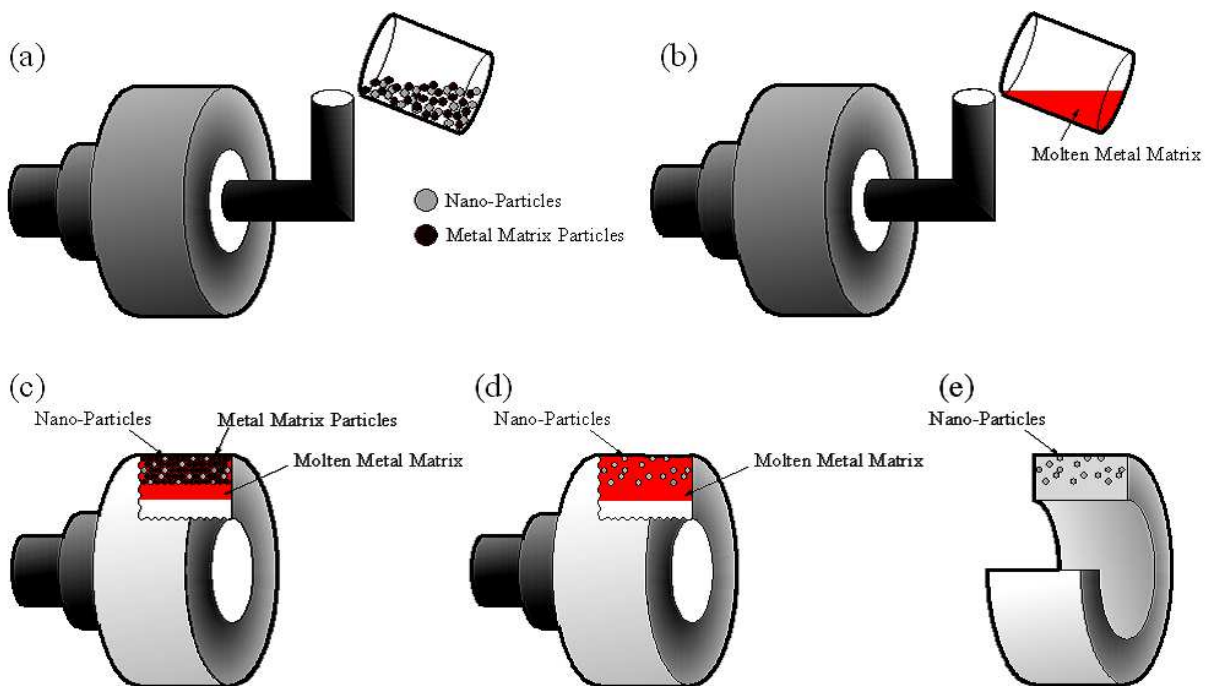


Figure I.10. Illustration schématique montrant le processus de la méthode centrifuge [26].

#### I.5.3.2. Coulage en bande (Tape casting):

Le coulage en bande c'est une méthode populaire appliquée à la production à grande échelle de substrats céramiques multicouches. Le processus de coulage en bande est illustré à la FigI.11. Une barbotine de suspension contenant une poudre est distribuée sur un film

support dans un type de coulée mince. L'épaisseur de la bande coulé est généralement comprise entre  $25\ \mu\text{m}$  et  $1\ \text{mm}$ . Des bandes minimales jusqu'à  $1\ \mu\text{m}$  pourraient être produites [27].

Les différentes étapes de la coulée en bande sont les suivantes: 1) barbotine de développement qui contient de l'eau, des particules de poudre et du liant, 2) séchage du corps vert ou du ruban adhésif, 3) consolidation du matériau dense du ruban. Afin de réaliser le FGM, des bandes de différents composites ont été préparées. Des unités carrées ont été découpées des bandes vertes qui ont ensuite été placées les unes sur les autres.

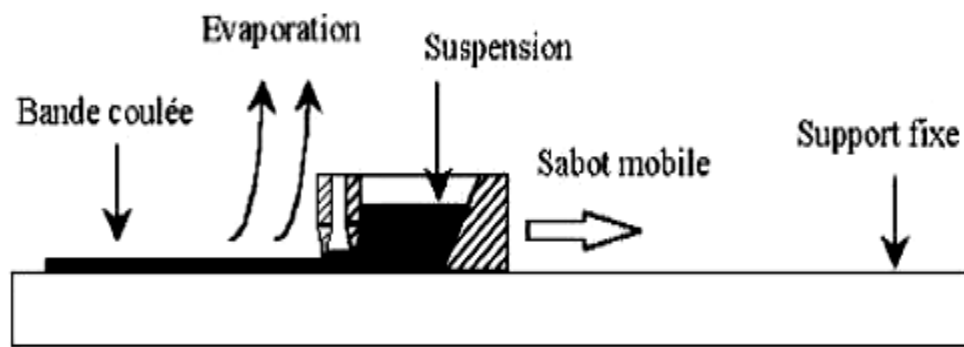


Figure I.11 : Dispositif de coulage en bande [28].

L'épaisseur des bandes appliquées est de l'ordre de  $200\ \mu\text{m}$ . La densification du ruban est obtenue par frittage. Des gradients étagés de matériaux céramiques-céramiques et céramiques-céramiques sont produits par coulée de rubans de différentes compositions et stratification ultérieure.

### I.5.3.3. Dépôt par électrophorèse:

Le dépôt électrophorétique consiste en différents procédés industriels tels que l'électrodéposition, le revêtement électrophorétique, l'électrodéposition anodique, l'électrodéposition cathodique et la peinture électrophorétique. Les scientifiques russes ont reconnu le dépôt électrophorétique (EPD) en observant un mouvement induit par un champ électrique de particules d'argile dans l'eau. Le premier travail expérimental réalisé aux États-Unis portait sur le dépôt de particules thorine ( $\text{ThO}_2$ :Dioxyde de thorium, solide blanc réfractaire) sur une cathode de platine en tant qu'émetteur d'électrons. La vulgarisation de la méthode EPD au cours des années 1980, en raison de son application à la fabrication de

différents outils de base en céramique, a été une étape importante dans l'historique des processus EPD [29].

Le principe de la technique de dépôt par électrophorèse se base sur la migration de particules chargées en suspension. Le déplacement des particules est généré par l'application d'un champ électrique entre deux électrodes. Un dépôt se forme alors sur une électrode comme l'illustre le schéma de la figure I.12.

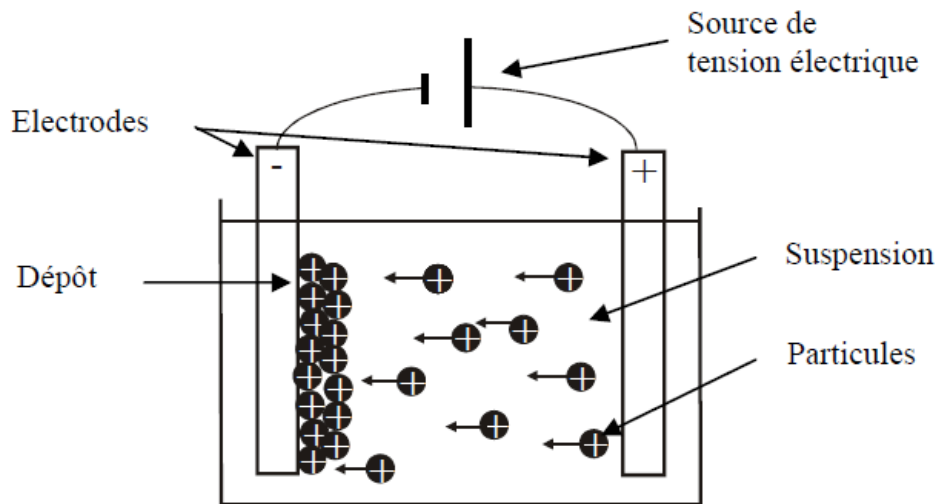


Figure I.12: Représentation schématique de la technique de dépôt par électrophorèse.

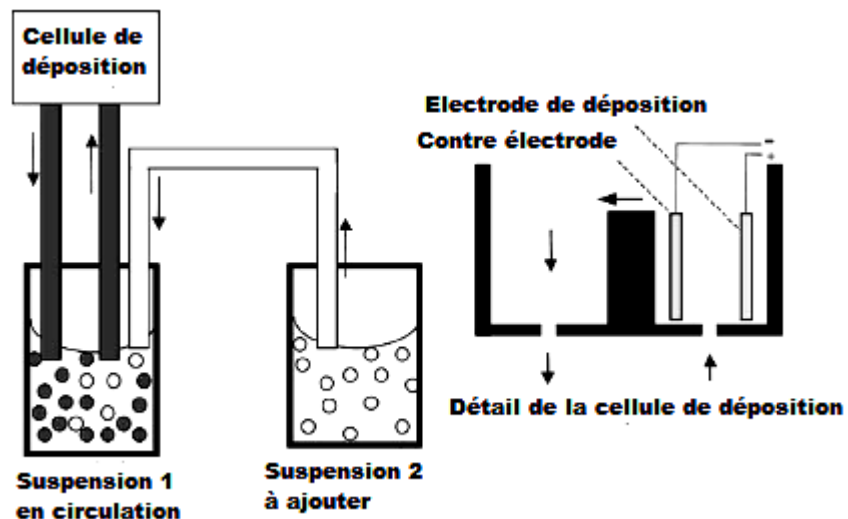
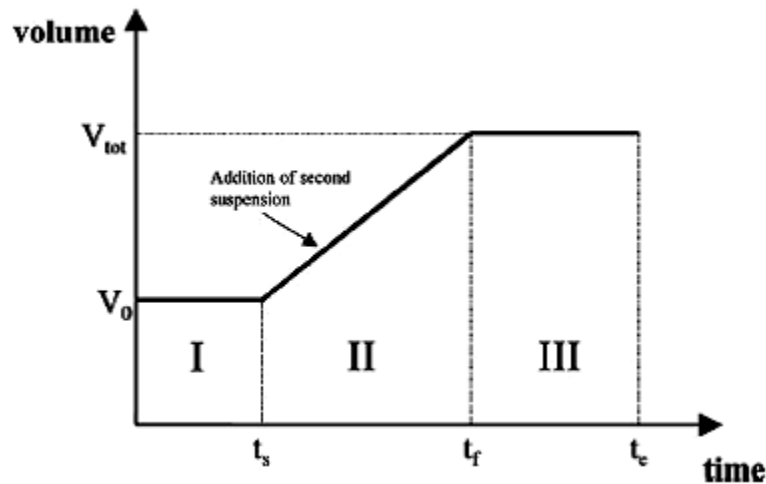


Figure I.13 : Vue d'ensemble générale de la configuration EPD [30].

Le procédé EPD pour produire des matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle est illustré schématiquement sur la figure I.13.

On considère un processus dans lequel les particules de poudre sont d'abord déposées à partir d'une suspension 1 de démarrage homogène. pendant le temps  $t_s$  (figure I.14). Dans une seconde étape, une seconde poudre est ajoutée à vitesse constante à la suspension circulante à partir d'une seconde suspension 2 homogène. L'addition de la deuxième poudre et donc la création d'un profil de gradient est arrêtée à l'instant  $t_f$ . Dans une troisième étape, le dépôt électrophorétique se poursuit jusqu'au temps  $t_e$ .



**Figure I.14 :** Volume de la suspension circulante comme une fonction au temps durant le processus FGM [30].

### I.5.3.4. Coulage Séquentiel en barbotine (Slip casting):

La coulage en barbotine c'est une méthode de mise en forme à base de poudre traditionnellement appliquée dans l'industrie de la céramique. En général, la coulée en barbotine est un processus de filtration où la suspension de poudre est versée dans un moule en plâtre poreux. En raison des forces capillaires résultantes, le liquide est retiré de la suspension (barbotine) et les particules de poudre sont forcées vers les parois. Un gradient sera formé en changeant la composition ou la taille des grains de la suspension de poudre appliquée pendant la procédure de coulée en barbotine. Cette technique nécessite également une étape de consolidation ultérieure, au cours de laquelle la poudre est densifiée (frittée) pour arriver à une structure en gradient FGM comme résultats [31].



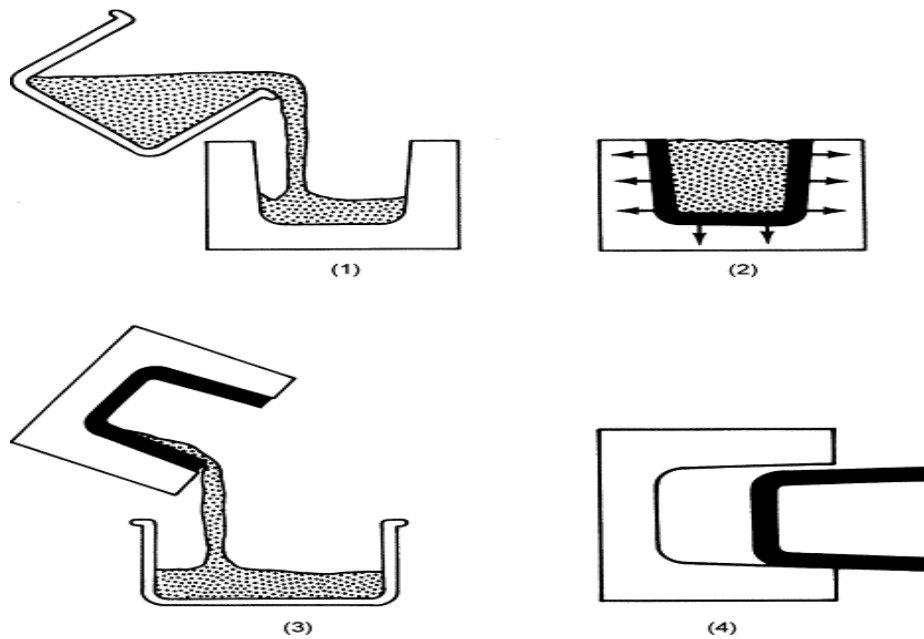


Figure I.15: Illustration du processus de coulée en barbotine [32].

#### I.5.3.5. Dépôt laser:

La génération d'un laser à haute intensité pour le dépôt de poudre de métal ou de céramique sur le substrat est la principale méthode de dépôt par laser.

Le dépôt au laser est une technique très appropriée lorsqu'il existe une différence significative de la température de fusion de la matrice et des matériaux de renforcement.

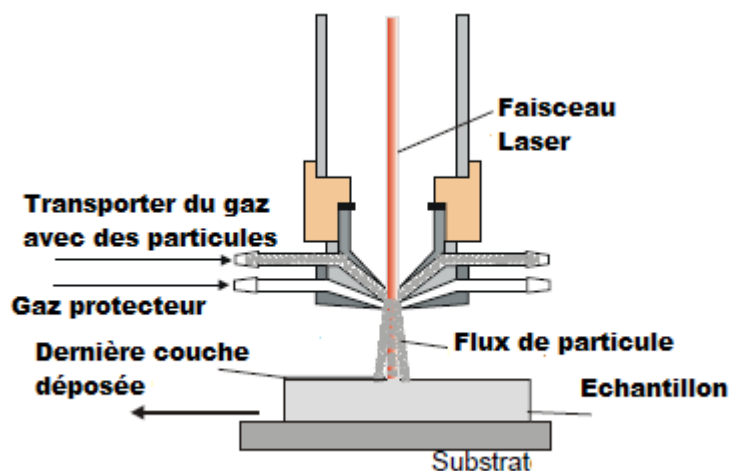
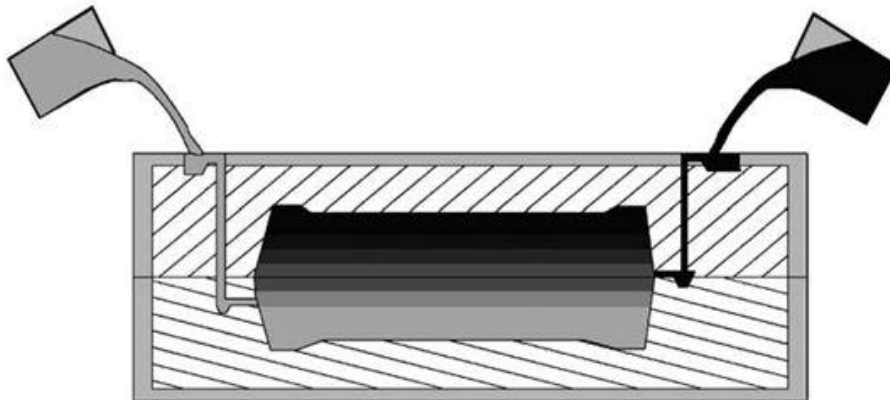


Figure I.16: Processus de base de dépôt au laser [33].

### I.5.3.6. Sédimentation:

La sédimentation et la flottation sont utilisées dans de nombreuses technologies de fabrication, en particulier pour la production de composites renforcés par des particules sur la base de la différence de densité entre les particules et la matrice. Une utilisation appropriée de la force de gravité présente partout sur la terre peut mener à la fabrication de structures graduées. En se concentrant sur le gradient de refroidissement thermique, la morphologie, la taille et la diffusion de masse des différentes phases, on obtient diverses structures de MMC et de PMC classées sur le plan fonctionnel [34].

En dépit de ses limites, cette méthode présente un potentiel pour la fabrication de produits FGM de type carreaux avec des dimensions plus importantes en raison de sa simplicité et de sa reproductibilité.



**Figure I.17** : Schéma de principe de la sédimentation [35].

### I.6. Domaine d'application:

Ces dernières années, l'utilisation de matériaux à gradient de propriétés (FGM) suscite un intérêt croissant en raison de leurs nombreux avantages par rapport aux matériaux composites.

Les FGM ont un grand potentiel dans les applications où les conditions de fonctionnement sont sévères, leurs utilisation augmente dans les secteurs de l'aérospatiale, de la défense, de l'industrie nucléaire, de la biomédecine et de l'électronique. Les FGM ont fournis deux propriétés contradictoires telles que la conductivité et l'isolation thermique et dans un matériau. Actuellement, ils permettent la production des matériaux légers, forts et durables, et ils sont applicables dans un large intervalle des domaines tels que les matériaux de construction, matériaux de conversion d'énergie, nucléaire et semi-conducteurs.

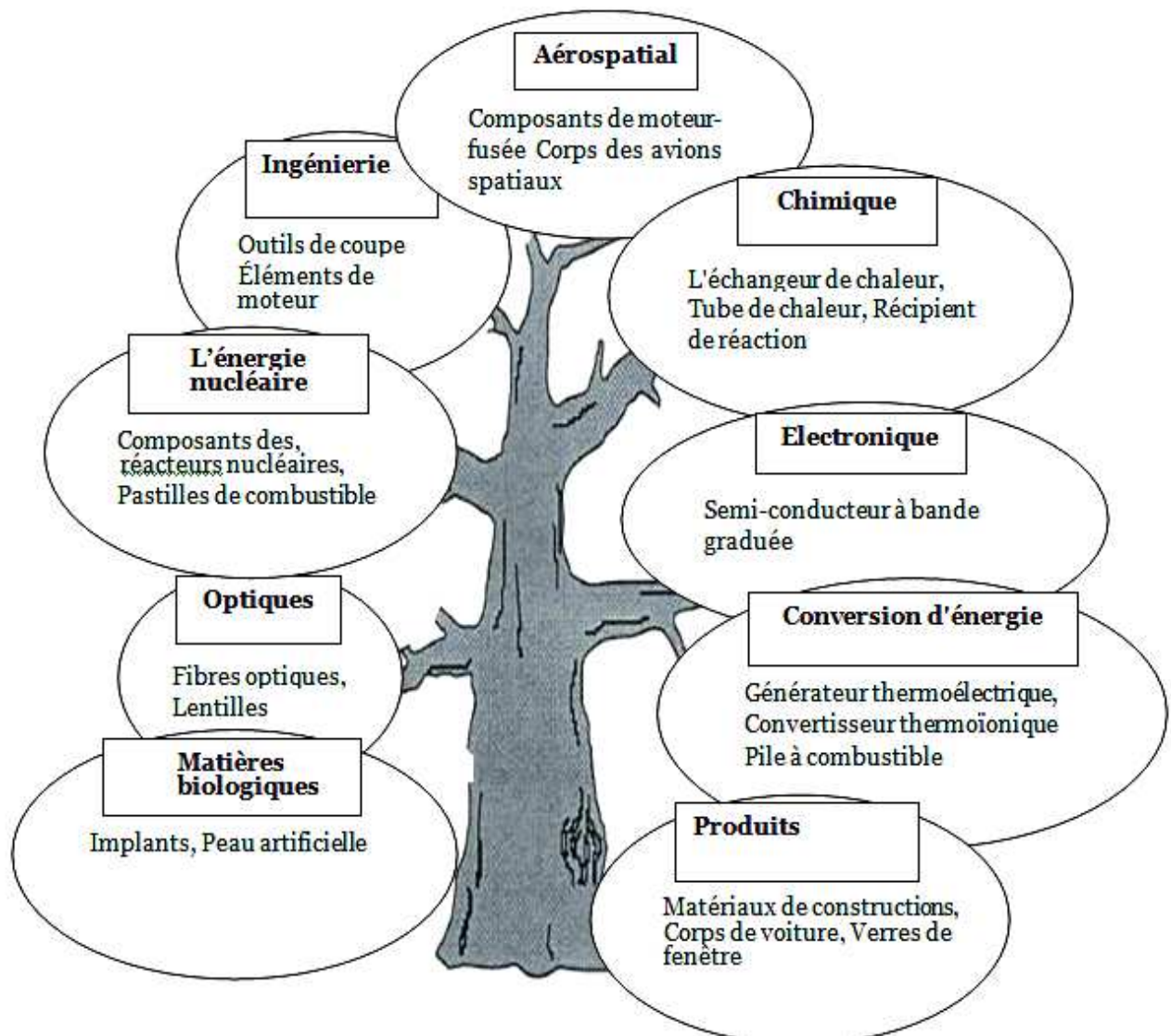


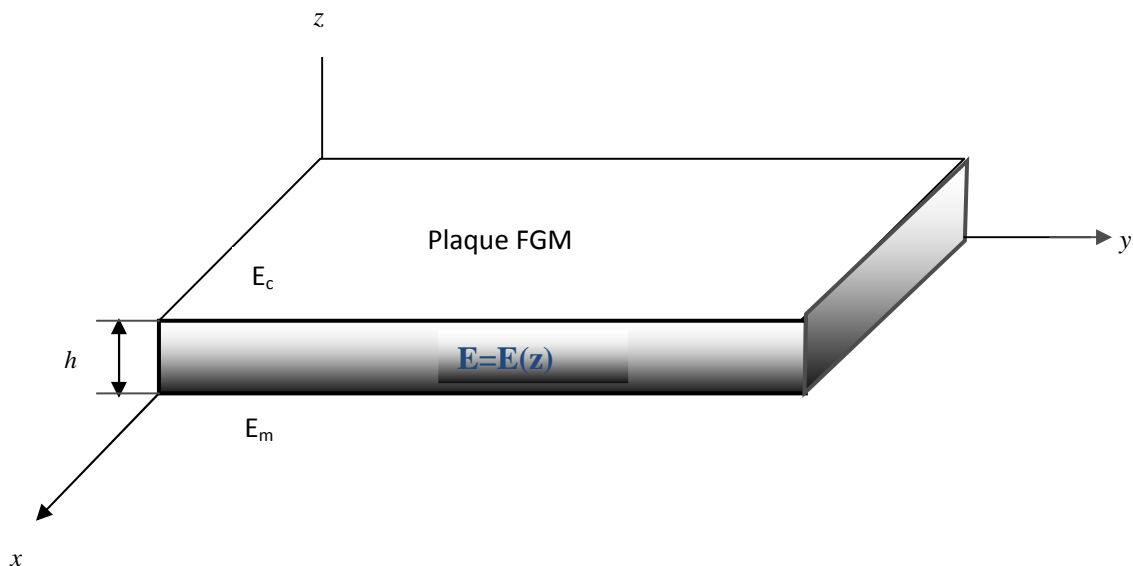
Figure I.18: Les principaux domaines d'application des FGM

### I.7. Lois régissant la variation des propriétés matérielles des plaques FGM:

Les matériaux à gradient de propriétés « FGM » consistent en l'association de deux matériaux aux propriétés structurales et fonctionnelles différentes avec une transition idéalement continue de la composition, de la structure et de la distribution des porosités entre ces matériaux de manière à optimiser les performances de la structure qu'ils constituent.

Les caractéristiques les plus distinctes des matériaux FGM sont leurs microstructures non-uniformes avec des macro-propriétés graduées dans l'espace. Un FGM peut être définie par la variation des fractions de volume. La plupart des chercheurs emploient la fonction de puissance, la fonction exponentielle, ou la fonction sigmoïde pour décrire les fractions de volume.

Les liaisons entre les particules doivent être assez dures à l'intérieur pour résister à la rupture, et également assez dures à l'extérieur pour empêcher l'usure.



**Figure I.19 :** Géométrie d'une plaque en FGM.

Les coordonnées  $x$  et  $y$  définissent le plan de la plaque, tandis que l'axe  $z$  perpendiculaire à la surface moyenne de la plaque et dans la direction de l'épaisseur.

Les propriétés du matériau dont le module de Young et le coefficient de Poisson sur les surfaces supérieures et inférieures sont différentes mais sont déterminés selon les demandes d'exécution.

Toutefois le module de Young et le coefficient de Poisson varient de façon continue, dans le sens de l'épaisseur (l'axe  $z$ ) soit :  $E = E(z), \nu = \nu(z)$ . Le module de Young dans le sens de

l'épaisseur de la plaque FGM varie en fonction de la loi de puissance (P-FGM) ou la fonction exponentielle (E-FGM) ou avec la fonction sigmoïde (S-FGM).

**I.7.1. Propriétés matérielles de la plaque P-FGM:**

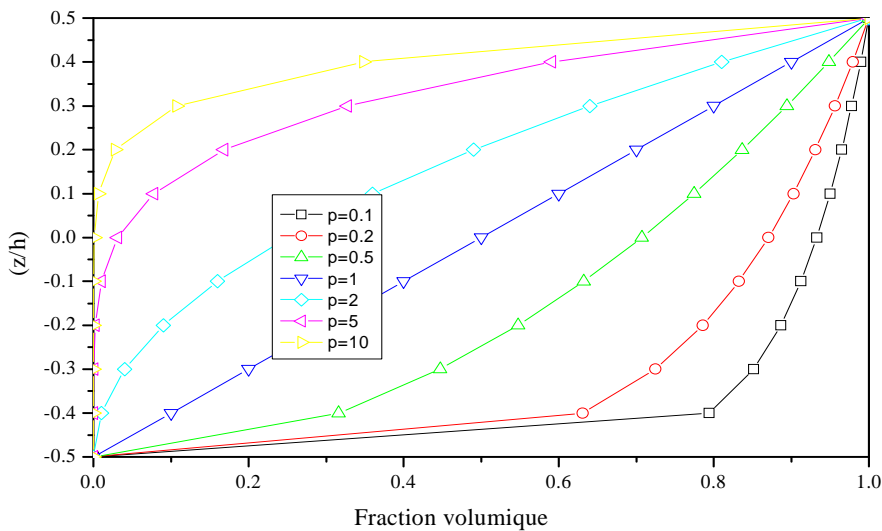
La fraction volumique de la classe P-FGM obéit à une fonction en loi de puissance.

$$V(z) = \left( \frac{z + h/2}{h} \right)^k \tag{I.1}$$

Où  $k$  est un paramètre matériels et  $h$  est l'épaisseur de la plaque. Une fois la fraction volumique locale  $v(z)$  à été définie, les propriétés matérielles d'une plaque P-FGM peuvent être déterminées par la loi des mélanges [35]:

$$E(z) = E_m + (E_c - E_m)V(z) \tag{I.2}$$

Où  $E_1$  et  $E_2$  sont respectivement les modules de Young de la surface inférieure ( $z = -h/2$ ) et de la surface supérieure ( $z = h/2$ ) de la plaque FGM, la variation du module de Young dans la direction d'épaisseur de la plaque P-FGM est représentée sur la figure I.17, il apparait clairement que la fraction volumique change rapidement près de surface inférieure pour  $k < 1$ , et augmenté rapidement près de la surface supérieure pour  $k > 1$ .



**Figure I.20 :** Variation de la fraction volumique dans une plaque P-FGM.

**I.7.2. Propriétés matérielles de la plaque S-FGM:**

Dans le cas d'ajouter une plaque P-FGM d'une simple fonction de loi de puissance à une plaque composite multicouche, les concentrations des contraintes apparaissent sur l'interfaces où le matériau est continu mais change rapidement [36]. Par conséquent, Chung et chi [37] ont défini la fraction de volume de la plaque FGM en utilisant deux fonctions de loi de puissance pour assurer une bonne distribution des contraintes parmi toutes les interfaces. Les deux fonctions de loi de puissance sont définis par :

$$V_1(z) = \frac{1}{2} \left( \frac{h/2 + z}{h/2} \right)^k \text{ Pour } -h/2 \leq z \leq 0 \tag{I.3.a}$$

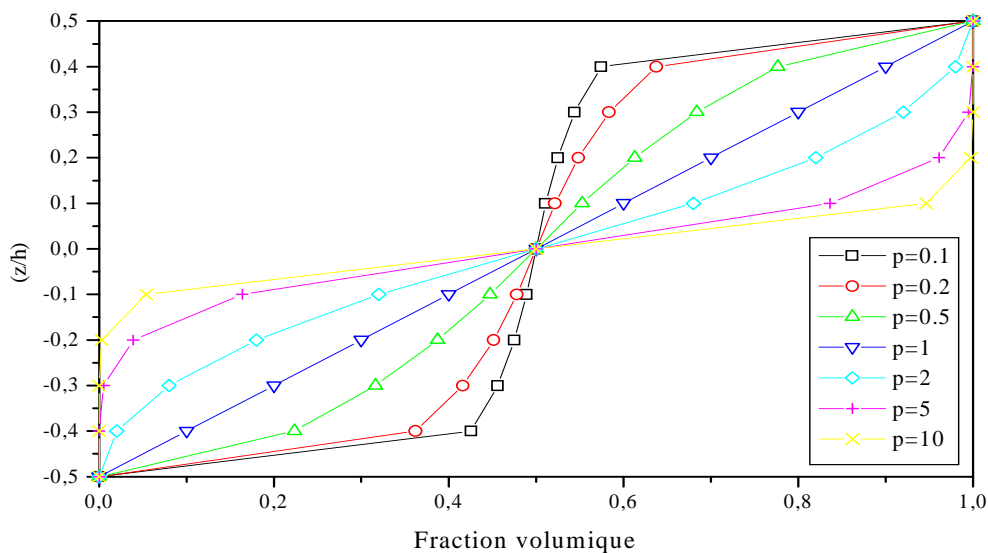
$$V_2(z) = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{h/2 - z}{h/2} \right)^k \text{ Pour } 0 \leq z \leq h/2 \tag{I.3.b}$$

En utilisant la loi des mélanges, le module de Young de la plaque S-FGM peut être calculé par :

$$E(z) = V_1(z) E_1 + [1 - V_1(z)] E_2 \text{ Pour } -h/2 \leq z \leq 0 \tag{I.4.a}$$

$$E(z) = V_2(z) E_1 + [1 - V_2(z)] E_2 \text{ Pour } 0 \leq z \leq h/2 \tag{I.4.b}$$

La figure I.18 montre que la variation de la fraction volumique dans les équations (I.4.a) et (I.4.b) représente les distributions sigmoïdes, et cette plaque FGM est appelée (Plaque S-FGM)



**Figure I.21:** Variation de la fraction volumique dans une plaque S-FGM.

**I.7.3. Les propriétés matérielles de la poutre E-FGM**

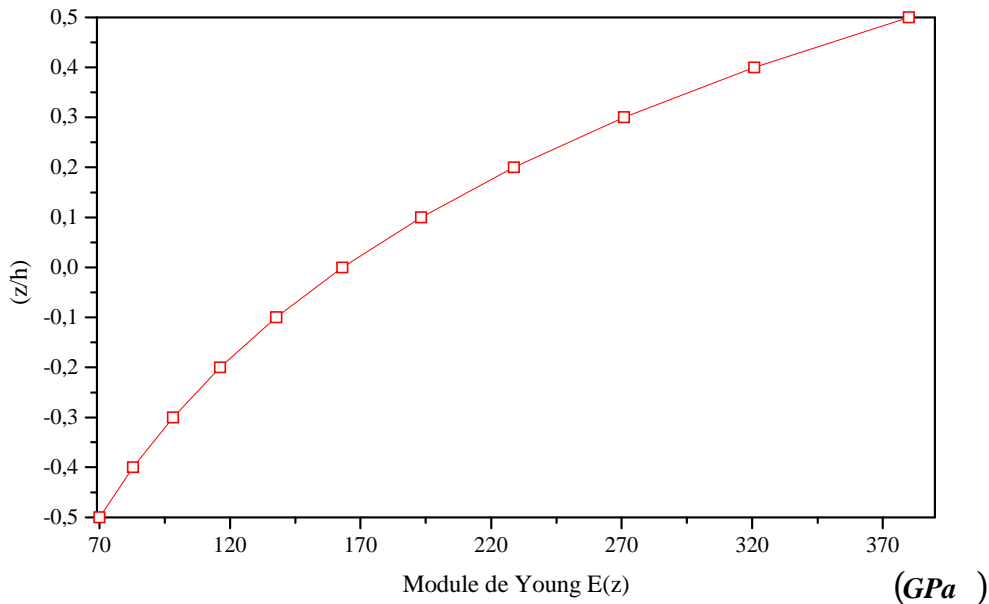
Pour décrire les propriétés matérielles des matériaux FGM, la plupart des chercheurs utilisent la fonction exponentielle qui s'écrit sous la forme, [38]:

$$E(z) = E_2 e^{B(z+h/2)} \tag{I.5.a}$$

Avec

$$B = \frac{1}{h} \ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right) \tag{I.5.b}$$

La variation du module de Young à travers l'épaisseur de la plaque E-FGM est représentée dans la figure I.19.



**Figure I.22 :** Variation du module de Young dans une plaque E-FGM.

**I.7.4. Le modèle d'homogénéisation de Mori Tanaka:**

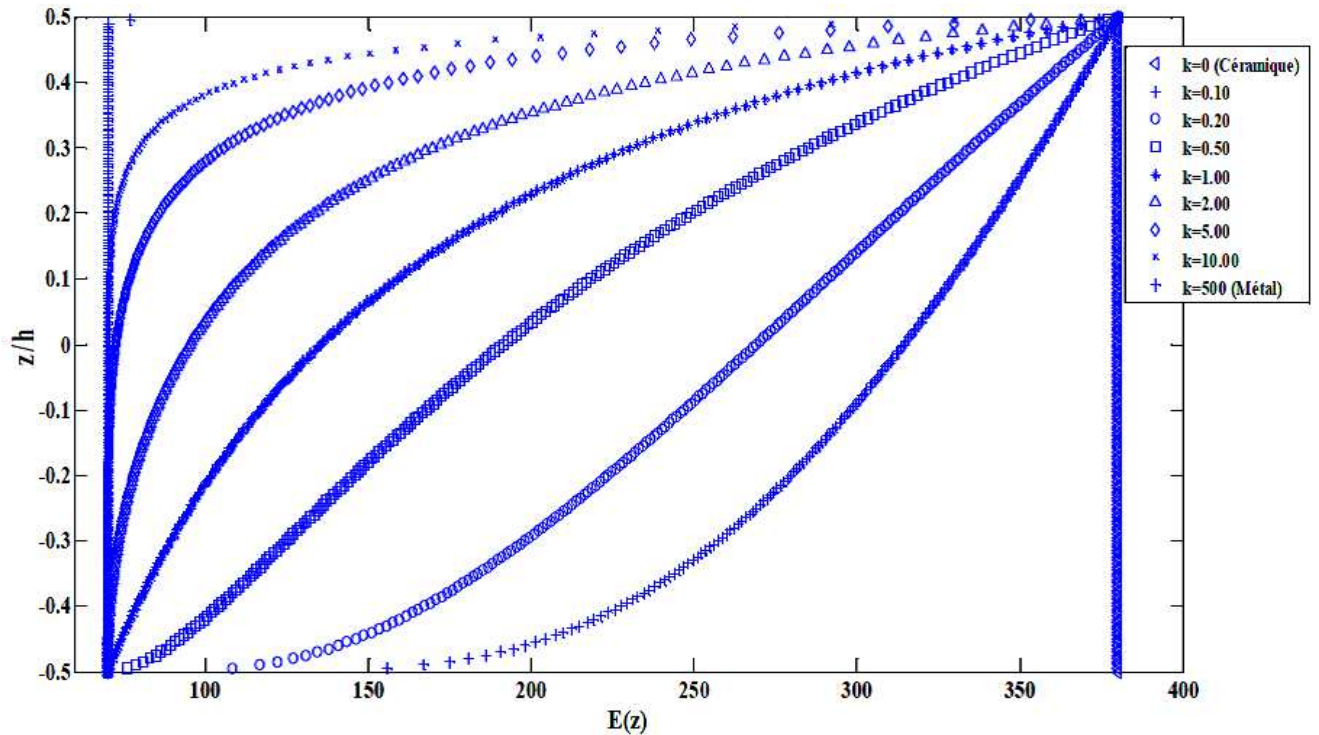
Pour le schéma de MoriTanaka, la fraction volumique de la plaque de FGM est donnée comme suit: [39], [40]:

$$P(z) = P_m + (P_c - P_m) \frac{V_c}{1 + V_m \left(\frac{P_c}{P_m} - 1\right) \frac{1 + \nu}{3 - 3\nu}}, V_m = 1 - V_c \tag{I.6a}$$

Où P désigne la propriété matérielle effective comme le module de Young E, Pm et Pc désigne la propriété des faces supérieure et inférieure de la plaque respectivement, k est l'exposant de la fraction volumique.

$$V_c = (0.5 + z/h)^k \tag{I.6b}$$

$V_c$  est la fraction volumique de la céramique. Étant donné que les effets de la variation du coefficient de Poisson  $\nu$  sur la réponse des plaques FGM sont très faibles [41] , [42], on suppose qu'elle est constante pour des raisons pratiques.



**Figure I.23 :** Distribution de module de Young à travers l'épaisseur de MT-FGMs.

**I.8. Conclusion:**

Les matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle sont devenus la pierre angulaire de la recherche sur les matériaux modernes, elles constituent un excellent matériau de pointe qui révolutionnera le monde de la fabrication et de l'ingénierie.

Dans ce chapitre, nous avons défini les matériaux à gradient fonctionnel « FGM », l'histoire de leur développement, leurs propriétés et leurs domaines d'application. La variation spatiale et progressive des propriétés de ces matériaux permet de créer des structures innovantes qui peuvent être exploitées dans de nombreux domaines d'application dans les structures spéciales en génie civil.



# **Chapitre II:**

## **Fabrication des FGM's**

### **(Al-HDPE) par sédimentation**

## Chapitre II: Fabrication des FGM's (Al-HDPE) par sédimentation

### 1. Introduction:

Le développement de la technologie solaire hybride photovoltaïque / thermique démontre le potentiel et les perspectives de l'énergie solaire. Dans notre système de panneaux de toiture solaires hybrides, les matériaux à gradient de propriétés fonctionnelles en aluminium et en polyéthylène haute densité (FGM Al-HDPE) sont intégrés pour offrir les avantages de l'efficacité de la récupération de la chaleur, de l'efficacité des matériaux et de l'intégrité structurelle.

### 2. Les FGM 's dans le domaines des panneaux solaire:

Au cours des dernières décennies, la consommation de ressources naturelles et la pollution lors de la production d'électricité sont devenues des problèmes critiques et urgents. Les bâtiments consomment jusqu'à 40% de toute l'énergie, c'est un pourcentage important de ressources naturelles non renouvelables et de matériaux de construction non recyclables. Afin de réaliser des améliorations spectaculaires en matière de conservation de l'énergie, des ressources naturelles et d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, il est nécessaire de revoir la manière dont les enveloppes de bâtiment sont conçues et fabriquées. La technologie photovoltaïque a évolué ces dernières années, les technologies intégrées de récupération de l'énergie solaire, telles que le système photovoltaïque intégré aux bâtiments (BIPV: building integrated photo voltaic), ont évolué pour devenir une solution prometteuse pour relever les défis énergétiques et environnementaux [43] (a).

#### 2.1. Centrales photovoltaïques:

L'énergie solaire est la conversion de la lumière du soleil en électricité, soit directement à l'aide de PV, soit indirectement à l'aide de l'énergie solaire concentrée (CSP). Les PV étaient initialement, et sont toujours, utilisés pour alimenter des applications de petite et moyenne taille, du calculateur alimenté par une seule cellule solaire aux maisons hors réseau alimentées par un générateur photovoltaïque. Ils constituent un choix d'énergie électrique important et relativement économique où le réseau électrique est peu pratique, trop cher à connecter ou simplement indisponible. Une centrale photovoltaïque alimente instantanément la puissance produite dans le réseau de distribution (le «réseau») au moyen d'un ou plusieurs onduleurs et

transformateurs. La première centrale photovoltaïque a été construite à Hesperia dans le sud de la Californie en 1982 avec une puissance nominale de 1 MW, en utilisant des modules de silicium cristallin montés sur un système de suivi à 2 axes. Le réseau de panneaux solaires flexibles unis a été installé en Californie en 2003 pour aider à alimenter l'exploitation du champ pétrolifère (puissance installée de 500 kWc). L'installation comprenait 4 800 panneaux solaires flexibles. Le projet solaire Agua Caliente de 250 MW aux États-Unis et le parc solaire Charanka de 221 MW en Inde comptent parmi les plus grandes centrales photovoltaïques au monde.

## **2.2. BIPV (Building-integrated photovoltaics ) conventionnel:**

Le photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV) sont des matériaux photovoltaïques utilisés pour remplacer des matériaux de construction conventionnels dans des parties de l'enveloppe du bâtiment telles que le toit et les façades. Les débuts des applications photovoltaïques pour les bâtiments ont commencé dans les années 1970. Les modules photovoltaïques à cadre en aluminium ont été connectés ou montés sur des bâtiments situés généralement dans des régions isolées sans accès à un réseau électrique. Dans les années 1980, on a commencé à faire des démonstrations d'ajout des modules photovoltaïques aux toits. Ces systèmes photovoltaïques étaient généralement installés dans les bâtiments raccordés au réseau de distribution dans des zones dotées de centrales électriques centralisées. Dans les années 1990, les produits de construction BIPV spécialement conçus pour être intégrés dans une enveloppe de bâtiment sont devenus disponibles dans le commerce [44] (b).

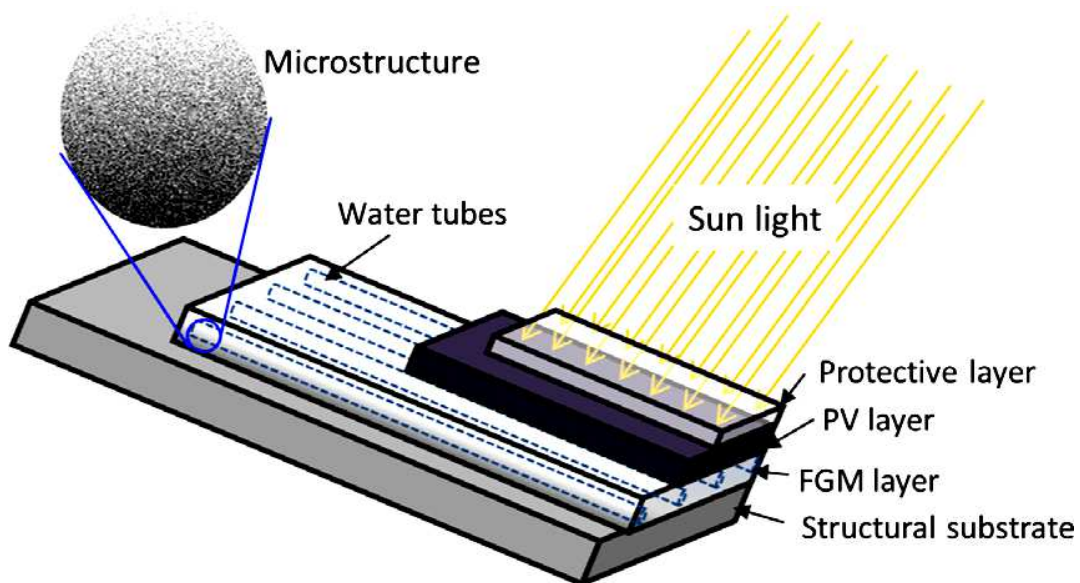
## **2.3. BIPV hybride:**

La prochaine génération de panneaux de toiture BIPV doit poursuivre une utilisation efficace de l'énergie, réduire les coûts de fabrication et de construction et offrir une excellente durabilité à long terme.

Le système énergétique proposé intègre de nouveaux panneaux solaires hybrides de manière transparente à la structure du bâtiment en tant que système photovoltaïque / thermique intégré au bâtiment (BIPVT), et utilise de manière adaptative plusieurs modes de fonctionnement pour optimiser les performances des panneaux et du système en fonction des conditions environnementales saisonnières et quotidiennes [45]. Le système est également conçu pour être adapté à différents climats et configurations de bâtiments. En utilisant une conception de panneau hautement efficace et des modes de fonctionnement optimisés, il est possible

d'obtenir un excellent rendement énergétique et économique des panneaux et de l'ensemble du système.

L'idée innovante de ce BIPVT est illustrée schématiquement à la Fig. 1, où une cellule solaire photovoltaïque (PV) (stratifiée par une couche protectrice) transfère directement l'énergie solaire en électricité; la couche de PV liée à un substrat structural à travers une couche de FGM, dans laquelle des tubes d'eau sont coulés pour recueillir l'énergie thermique par écoulement d'eau et ainsi contrôler la température du panneau [44] (b).



**Figure II.1:** Illustration schématique du panneau de toiture solaire hybride.

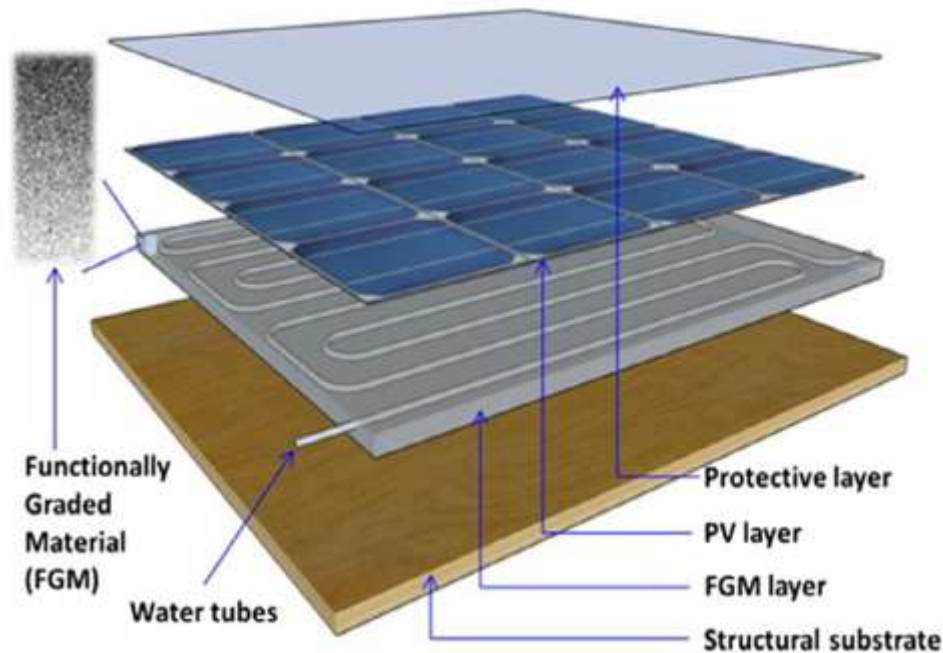
### 3. Avantages BIPV conventionnel:

La conception innovante associée au système solaire hybride photovoltaïque / thermique et au système de contrôle de la température, dont la section transversale est illustrée à la figure 1.3.5, offre les avantages multifonctionnels de la production d'énergie et des économies d'énergie comme suit [45]:

1. Efficacité PV améliorée : Il est connu que la plupart des panneaux de toiture solaires actuels ne fonctionnent que dans la plage de température de 40 à 85 C, et l'efficacité d'utilisation de l'énergie diminue considérablement avec l'augmentation des températures de fonctionnement .

Après une exposition au rayonnement solaire pendant un certain temps, la température d'une cellule PV augmentera; ensuite, la chaleur peut être conduite de la cellule PV à la partie supérieure du FGM. De l'eau froide, dont le débit est contrôlé par le panneau, est introduite à

travers les tubes d'eau pour refroidir le module PV. Par conséquent, l'efficacité de la cellule PV sera améliorée dans des conditions de température modérée.

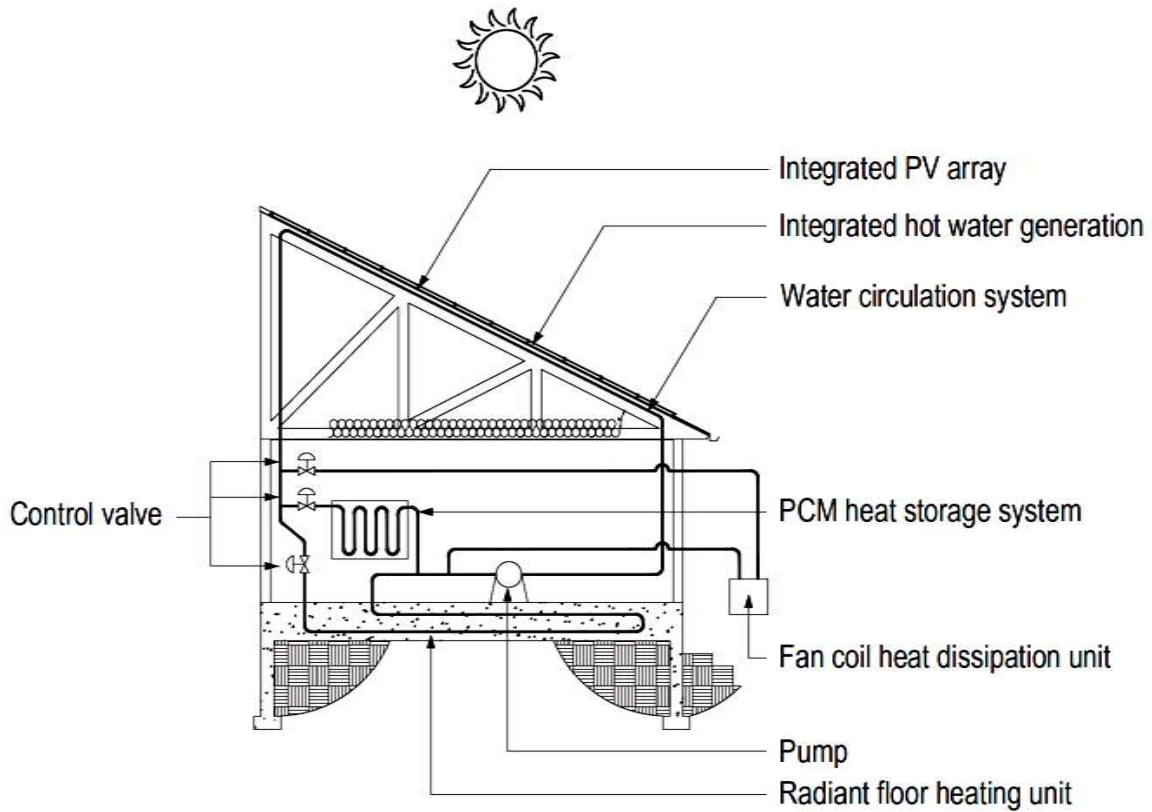


**Figure II.2:** Les couches d'un panneau de toiture photovoltaïque-thermique intégré au bâtiment (BIPVT).

2. Alimentation en chauffage gratuite : Pendant le processus de refroidissement du module PV, la chaleur est récupérée dans l'eau. Après avoir traversé le système PVT holistique, l'eau chaude ou tiède est collectée dans des systèmes d'eau préchauffée pour le chauffage au sol et au plafond ou pour un usage domestique.

3. Demande de refroidissement réduite : En été, l'excellente performance d'isolation thermique du panneau et la température modérée du toit contrôlée par le débit d'eau créeront une condition intérieure plus confortable, l'énergie pour la demande de refroidissement peut être économisée en conséquence.

4. Déneigement et déglçage - En hiver, de l'eau chaude peut être introduite pour enlever la glace et la neige du toit, nettoyer les panneaux solaires, et ainsi restaurer et améliorer l'utilisation de l'énergie solaire.



**Figure II.3:** Coupe transversale du système résidentiel [45].

En plus des avantages ci-dessus, par rapport à la construction sandwich traditionnelle, l'utilisation de l'intercalaire Al-HDPE FGM réduit le nombre total de couches et offre les avantages suivants [45]:

1. Efficacité de récupération de la chaleur : les tubes d'eau sont intégrés dans la partie supérieure de la couche FGM, où la concentration élevée d'aluminium crée une conductivité thermique élevée afin que la chaleur puisse être transférée efficacement aux tubes d'eau dans toutes les directions, tout en étant simultanément isolée par la partie inférieure de la couche FGM, qui est faite de HDPE pur.
2. Efficacité du matériau : En raison de la variation progressive de la proportion de phase des matériaux, seule une petite quantité de poudre d'aluminium est nécessaire. Cela réduit le coût du panneau car le matériau en aluminium est relativement coûteux.

3. Intégrité structurelle : La couche absorbante et la couche isolante en PVT traditionnel peuvent être remplacées par une couche FGM qui intègre la conductivité thermique élevée de la partie riche en aluminium dans la partie supérieure et l'isolation thermique du HDPE pur dans la partie inférieure. Étant donné que la fraction volumique de la poudre d'aluminium (Al) varie continuellement dans le sens de l'épaisseur, la distribution des propriétés thermomécaniques change en douceur et évite la concentration de contraintes thermiques à travers les couches, augmentant l'intégrité structurelle et la durabilité des panneaux.

#### 4. Fabrication des FGM a base aluminium / polyéthylène haute densité:

Le FGM proposée a été réalisée en poudre d'aluminium grossière et en polyéthylène haute densité (PEHD) selon une approche combinée de vibration et de sédimentation. La taille de la poudre d'aluminium grossière varie de 100 à 600  $\mu\text{m}$ , avec une taille médiane de 300  $\mu\text{m}$ ; tandis que la taille du polyéthylène haute densité plus fin (PEHD) varie de 1 à 100  $\mu\text{m}$  avec une taille médiane de 25  $\mu\text{m}$  [44]. Cependant, dans la pratique, il a été constaté que la fraction volumique maximale de Al sur HDPE dans un composite mixte ne peut atteindre environ 60%, car il faut une quantité suffisante de HDPE pour solidifier les particules d'Aluminium.

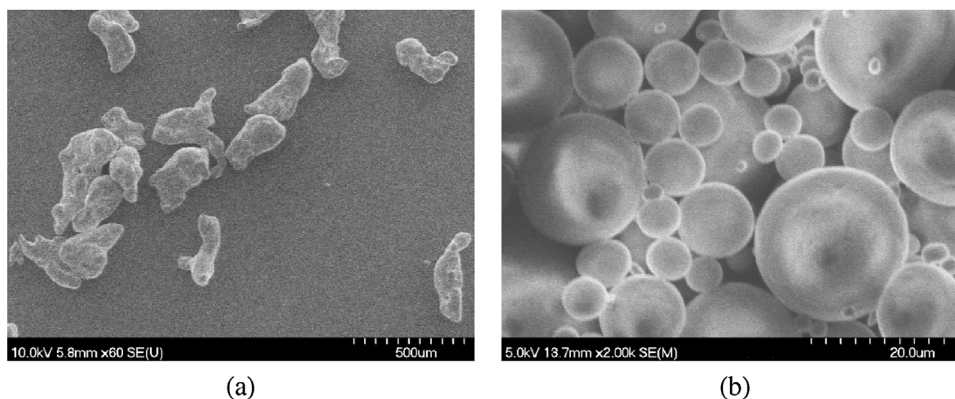
La gradation de la couche d'Al-HDPE FGM a une fraction volumique de particules d'Al passant de 100% à 0% du bas vers le haut de la couche décantée, tandis que les poudres HDPE ont une tendance complètement opposée. La fraction volumique maximale d'Al en HDPE dans un composite mixte ne peut atteindre qu'environ 60% en raison du fait que suffisamment de matériaux HDPE sont nécessaires pour solidifier les particules d'Al pendant le processus de frittage par la suite. Compte tenu de cela, la gradation souhaitée du FGM AL-HDPE en termes de fraction volumique d'aluminium FGM est conçue pour être de 0% à 50% sur son épaisseur. En visant cette gradation, une conception de mélange du FGM avec un rapport de volume approprié d'Al au HDPE de 1: 3 a été déterminée après une série d'essais et de comparaisons, et l'éthanol ajouté pour le mélange a été choisi par le rapport de poids de l'éthanol à la poudre mélangée à 28%. La masse introduite **d'Al, de HDPE et d'éthanol** basée sur la conception du mélange final pour un panneau FGM de 12'' x 12'' x 0,5'' est de 876,05 g, 895,52 g et 688,95 g, respectivement [43] (a).

La raison d'utiliser de l'éthanol au lieu de l'eau est double :



(a) en raison de la densité spécifique de l'eau comprise entre celles de l'Al et du PEHD, elle conduit souvent à un dépôt laminé au lieu d'une microstructure graduée.

(b) lorsque le processus de sédimentation est long (plus de 10 h), une réaction chimique entre Al et l'eau a été observée, ce qui produit de l'hydrogène et de l'alumine.



**Figure II.4:** SEM observation de (a) aluminium (Al-111); et (b) de la poudre de polyéthylène haute densité[43] (a).

#### 4.1. Solidification du panneau FGM:

Après que l'éthanol a été complètement évacué de la suspension, les composites mélangés Al-HDPE dans le moule ont été placés dans un four à vide et chauffés à une température de 170 C°. Lorsque le PEHD est complètement fondu, la soupape à vide a été activée et la pression d'air à l'intérieur du vide a été progressivement réduite à 500 T. Ce processus de dégazage prend environ 6 h, ce qui a été conçu pour éliminer autant de vides d'air que possible dans le FGM afin que la conductivité thermique du FGM soit maximisée. Néanmoins, il a été observé qu'une certaine quantité de vides d'air restera toujours dans l'échantillon durci. L'échantillon a été durci dans l'étuve à vide à 170 C° avec la soupape à vide activée pendant environ 1 h, puis le four à vide a été éteint, l'ensemble de l'installation a été désactivé et l'échantillon de FGM a été retiré du moule lorsque la température s'est refroidie à la température ambiante.

#### 5. Caractérisation expérimentale de la plaque FGM:

La section transversale d'un élément d'échantillon (12,7 mm de hauteur 20,3 mm de largeur) découpé dans le panneau FGM est représentée sur la figure 2, qui montre qu'une FGM calibrée bien contrôlée a été obtenue. Selon l'analyse de gradation de la présente FGM, une gradation linéaire des composants le long de sa direction d'épaisseur a été obtenue, qui peut



être exprimée via la relation entre la fraction volumique de l'aluminium par rapport au PEHD ( $\phi$ ) et son emplacement en hauteur ( $z/h$ ) comme [46]:



**Figure II.5:** Microstructure du panneau FGM contenant des particules d'aluminium dispersées dans la matrice HDPE, la concentration changeant dans le sens de l'épaisseur [43,46].

$$\phi = \frac{47.44 \frac{z}{h} + 3}{0.97 - 0.47 \frac{z}{h}} \quad \text{II - 1}$$

( $\phi$ ) : la fraction volumique de l'aluminium par rapport au PEHD.

Sur la base des travaux expérimentale et résultats de Chen et Yin [43] (a), on a tracer les courbes concernant E le module de Young ,  $\nu$  coefficient de poisson ,  $\rho$  la densité ,  $\alpha$  la diffusivité ,  $\lambda$  la conductivité thermique , et  $\beta$  la dilatation par rapport à  $\phi$  la fraction volumique de l'aluminium par rapport au PEHD.

A partir des courbe de tendance on peut tracé des formule polynomiales qui définie la relation de ces grandeur et coefficient avec la fraction volumique. Afin de définir les valeurs caractéristique de chaque couche de la plaque FGM suivant l'épaisseur.

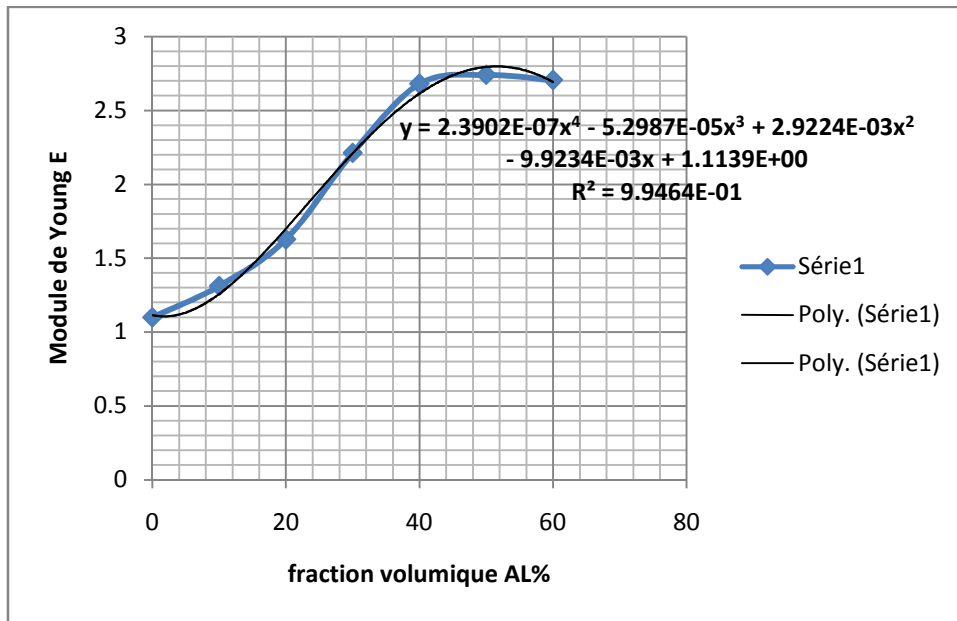


Figure II.6: Variation du Module de Young du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.

$$E = 2.39 \times 10^{-7}\phi^4 - 5.298 \times 10^{-5}\phi^3 + 2.922 \times 10^{-3}\phi^2 - 9.923 \times 10^{-3}\phi + 1.113 \text{ (GPa)}$$

II – 2

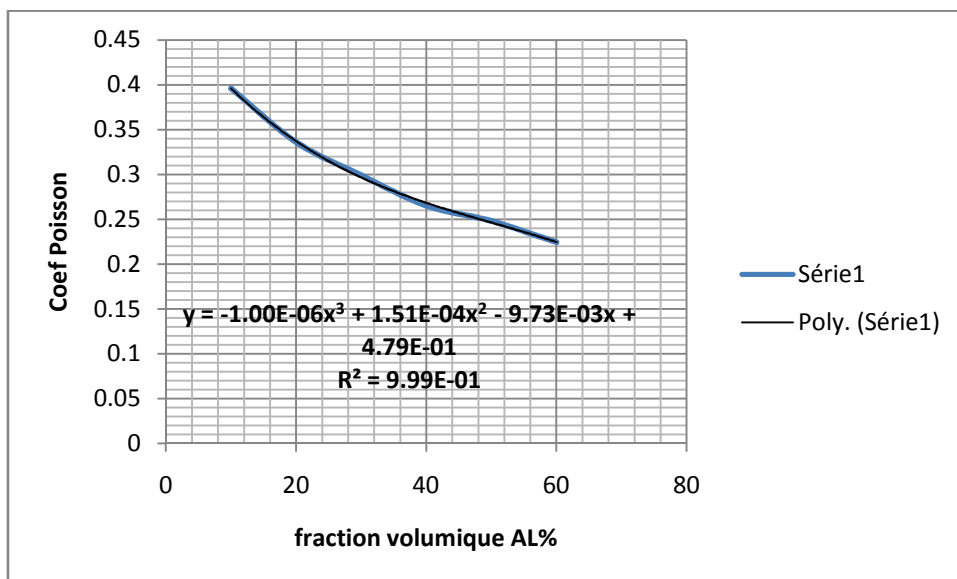


Figure II.7: Variation du coefficient de poisson du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.

$$\nu = -10^{-6}\phi^3 + 1.51 \times 10^{-4}\phi^2 - 9.73 \times 10^{-3}\phi + 0.48 \quad \text{II - 3}$$

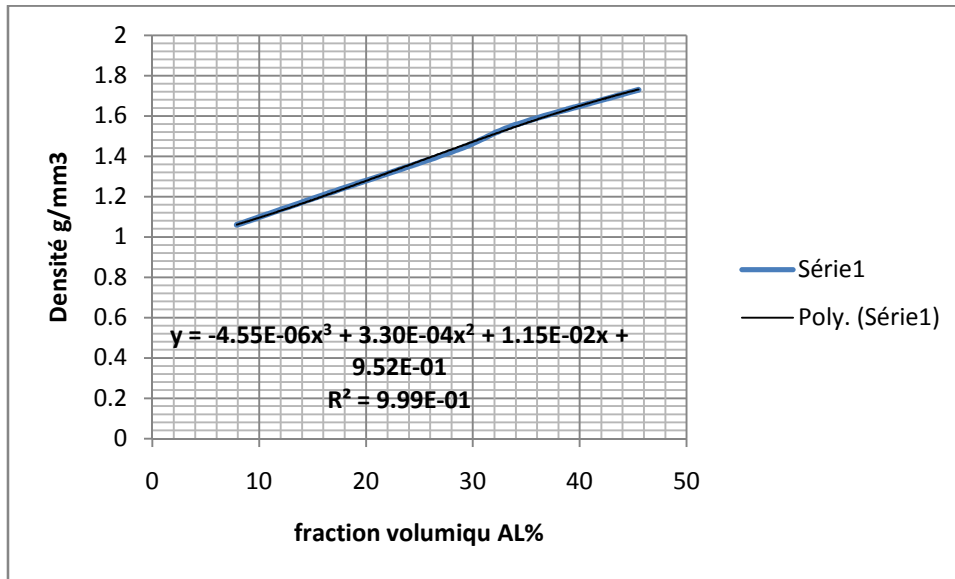


Figure II.8: Variation de la densité du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.

$$\rho = -4.55 \times 10^{-6}\phi^3 + 3.3 \times 10^{-4}\phi^2 + 1.15 \times 10^{-2}\phi + 0.952 \quad \text{II - 4}$$

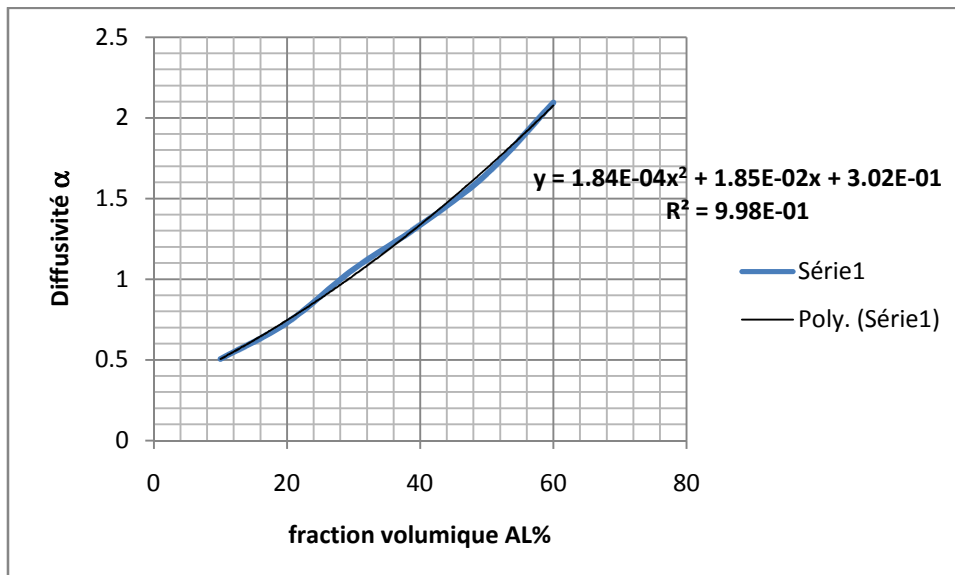


Figure II.9: Variation de la diffusivité du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.

$$\alpha = 1.837 \times 10^{-4}\phi^2 + 1.854 \times 10^{-2}\phi + 0.3023 \quad \text{II - 5}$$

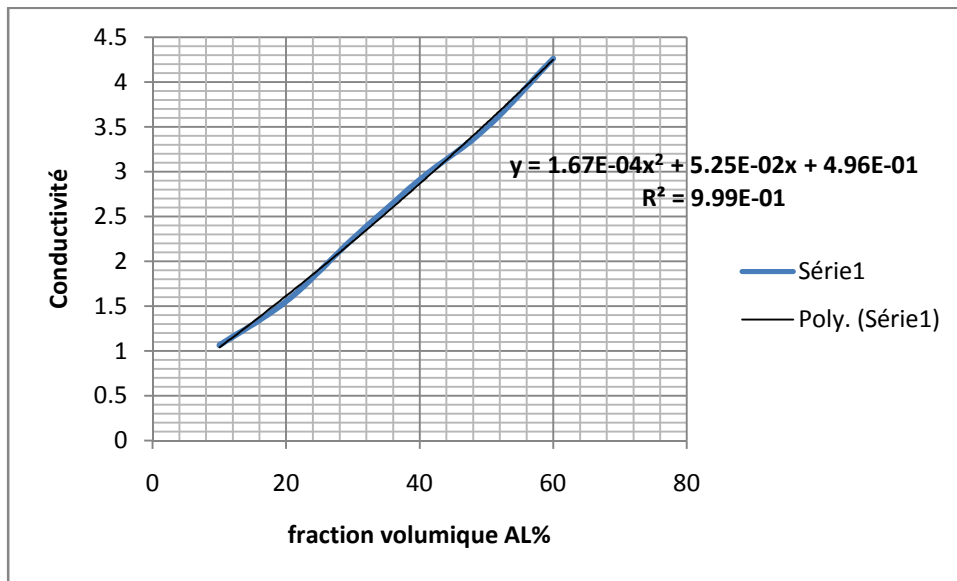


Figure II.10: Variation de la conductivité du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.

$$\lambda = 1.673 \times 10^{-4}\phi^2 + 5.247 \times 10^{-2}\phi + 0.4965$$

II – 6

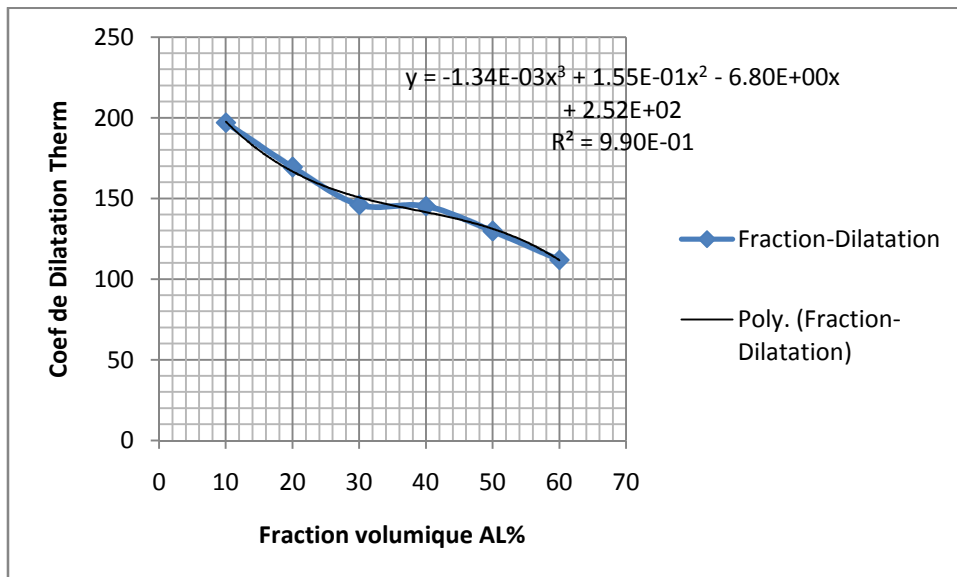


Figure II.11: Variation du coefficient de dilatation du FGM par rapport à la fraction volumique d'Al au HDPE.

$$\beta = 134 \times 10^{-5}\phi^3 + 15.494 \times 10^{-2}\phi^2 - 6.804\phi + 251.515$$

II – 7

**6. Conclusion:**

Dans cette étude, un matériau à gradient de propriétés fonctionnelles FGM ( aluminium / polyéthylène haute densité) est fabriqué comme composant essentiel d'une enveloppe de bâtiment multifonctionnelle à haute performance pour l'efficacité énergétique et la durabilité. La production du FGM a été réalisée en utilisant des particules d'aluminium grossières et de fines poudres de PEHD grâce à une approche combinée de vibration et de sédimentation.

Afin de caractériser les propriétés des matériaux du FGM, des travaux expérimentale et résultats de Chen et Yin sur des panneaux composites uniformes Al-HDPE avec 6 fractions volumiques différentes (10%, 20%, 30%, 40%, 50% et 60 % d'Al sur HDPE) . et cela pour tracer des courbes de tendance avec des formules polynomiales qui définie la relation de ces grandeur et coefficient avec la fraction volumique.

# **Chapitre III:**

## **Modélisation d'une plaque FGM (Al-HDPE) par ANSYS (ADPL)**

## Chapitre III: Modélisation d'une plaque FGM (Al-HDPE) par ANSYS (ADPL)

### 1. Introduction:

Une analyse de structure permet de prédire la réponse d'un milieu (solide ou fluide) soumis à des conditions imposées par l'environnement externe (force, déplacement, flux thermique,...). Le but d'une analyse structurale est de déterminer les contraintes et déformations d'un système ou un composant auquel on applique un chargement, cela à partir des déplacements  $\{u\}$  créés par ce chargement  $\{F\}$ . Cette prédiction est basée sur la satisfaction de quelques équations fondamentales (équation d'équilibre mécanique, équation de la chaleur, loi de comportement...).

Le logiciel ANSYS, dans sa version ANSYS Mechanical ou Multiphysics, permet une gamme complète d'analyses structurales. Ainsi ANSYS gère trois types principaux d'analyse structurale mécaniques, auxquelles il faut ajouter les analyses de chargement thermiques, et les analyses des réponses propres de la structure (flambement et modes de résonance propres en particulier).

### 2. Présentation Générale d'Ansys :

La construction de solutions à des problèmes d'ingénierie à l'aide de FEA nécessite soit le développement d'un programme informatique basé sur la formulation FEA, soit l'utilisation d'un programme FEA à usage général disponible dans le commerce tel que ANSYS. Le programme ANSYS est un outil d'analyse puissant et polyvalent qui peut être utilisé dans une grande variété de disciplines d'ingénierie [47].

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- **ANSYS classique** : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (*ANSYS Parametric Design Language*, C'est le langage de programmation utilisé par les logiciels de calcul par éléments finis d'Ansys). *ANSYS classique* est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.
- **ANSYS Workbench** : Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non

confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

### **3. Organisation du calcul utilisant la théorie des éléments finis :**

la méthode générale utilisée pour résoudre les problèmes par éléments finis peut se décomposer de la manière suivante :

#### **3.1. Choix de la géométrie et du maillage :**

définition des points, des lignes des surfaces et des volumes ainsi que leur discrétisation. Lors de cette étape, il faut absolument prendre en compte le fait que seuls les éléments de maillage qualifiés peuvent être faire l'objet d'un post-traitement.

#### **3.2. Définition du modèle mathématique (données caractérisant le modèle) :**

Formulation : mécanique, thermique, thermomécanique, fluide...

Type d'analyse : statique, transitoire, dynamique,...

Comportement du matériau : élastique, isotrope, plastique, ...

Type d'éléments : poutre, barre, coque, triangle, cube...

Définition des propriétés des matériaux : module d'élasticité, masse volumique, coefficient de Poisson, conductivité thermique...

Définition des propriétés géométriques: section, inerties, épaisseur,...

Définitions des conditions aux limites : blocage des déplacements,....

Définitions des conditions initiales et des sollicitations : chargement mécanique, thermique, électrique,....

#### **3.3. Résolution du problème discrétisé :**

Calcul des matrices de rigidité et de masse de chaque élément fini.

Assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.

Application des conditions aux limites et des chargements.

Résolution du système d'équations.

#### **3.4. Analyse et post-traitement des résultats :**

Quantités locales : déplacements, contraintes, déformations, ...

Quantités globales : déformation maximale, énergie de déformation,...



#### 4. Propriétés thermo-mécaniques des matériaux :

Les analyses structurales sous ANSYS demandent la connaissance des propriétés thermomécaniques suivantes des matériaux:

- module d'élasticité,
- coefficient de Poisson,
- densité (si des forces d'inertie sont envisagées),
- coefficient de dilatation thermique (si un chargement en température est appliqué),
- conductivité thermique (uniquement dans le cas où les conditions de température sont non uniformes).

Tableau III-1:Unités SI des propriétés thermo-mécaniques des matériaux.

<b>Module d'élasticité</b>	<b>Pa</b>
<b>Densité</b>	<b>Kg.m<sup>-3</sup></b>
<b>Coefficient de dilatation thermique</b>	<b>m.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup></b>
<b>Conductivité thermique</b>	<b>W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup></b>

#### 5. Chargements thermo-mécaniques:

ANSYS permet une gamme complète de chargements et de conditions aux limites pour des calculs thermo-mécaniques, allant d'un simple chargement par une pression hydrostatique en analyse linéaire statique, à des mécanismes de transfert de contraintes plus compliqués avec par exemple la modélisation de la réaction de structures à l'impact. Tous les chargements et les conditions aux limites peuvent être ainsi modélisés comme des fonctions du temps.

Les principaux chargements disponibles dans le cadre d'une analyse linéaire statique sont :

- la gravité terrestre, dont la valeur est automatiquement donnée dans le système d'unité choisi, et dont on choisit la direction d'application, soit dans le système de coordonnées global, ou bien dans un système local ;
- une accélération (m.s<sup>-2</sup>), dont les forces résultantes agissent dans la direction opposée à l'accélération (comme être projeté en arrière dans un siège quand une voiture accélère) ;
- une vitesse de rotation (rad.s<sup>-1</sup>), pour le cas d'un solide en rotation autour d'un axe à une vitesse déterminée ;

- une force ( $\text{kg.m.s}^{-2}$ , soit N), qui peut être ponctuelle, ou bien répartie suivant une arête, une surface ou le corps tout entier ;
- une pression ( $\text{N.m}^{-2}$ , soit Pa), qui, appliquée sur une surface ou à un groupe de nœuds, agit normalement à cette surface, vers la surface pour une valeur positive, hors de la surface pour une valeur négative. On peut également appliquée une « pression linéaire » sur une arête ;
- une pression hydrostatique ( $\text{N.m}^{-2}$ , soit Pa), qui applique une variation linéaire de pression à une surface (corps 3D ou coque) pour simuler l'action d'un fluide sur la structure, depuis son intérieur (fluide contenu dans le corps), ou bien son extérieur (corps immergé). On précise alors la densité du fluide, et la direction et l'amplitude de l'accélération ;
- un moment ( $\text{N.m}$ ), ponctuel ou distribué sur une arête, une surface ou un groupe de nœuds ;
- une force de portée (N), représentant la distribution de la force de compression exercée sur une surface cylindrique, par exemple dans le cas d'un corps suspendu par une goupille ;
- une force de pré-tension (N), pour le boulonnage d'un assemblage, s'exerçant sur un solide de section cylindrique ou une barre;
- une force isolée (N), conduisant à une force équivalente et un moment sur une surface du corps ;
- un chargement thermique, par application d'une température uniforme, après avoir spécifié une température de référence.

## 6. Types d'analyse thermique:

ANSYS prend en charge deux types d'analyse thermique:

Une analyse thermique en régime permanent détermine la distribution de la température et d'autres grandeurs thermiques dans des conditions de charge en régime permanent. Une condition de charge en régime permanent est une situation dans laquelle les effets de stockage de chaleur variant sur une période de temps peuvent être ignorés.

Une analyse thermique transitoire détermine la distribution de la température et d'autres grandeurs thermiques dans des conditions qui varient sur une période de temps.

Une analyse thermique en régime permanent calcule les effets des charges thermiques stables sur un système ou un composant. Les ingénieurs / analystes effectuent souvent une analyse en régime permanent avant d'effectuer une analyse thermique transitoire, pour aider à établir les

conditions initiales. Une analyse en régime permanent peut également être la dernière étape d'une analyse thermique transitoire, effectuée une fois que tous les effets transitoires ont diminué.

Vous pouvez utiliser l'analyse thermique en régime permanent pour déterminer les températures, les gradients thermiques, les débits thermiques et les flux thermiques dans un objet qui sont causés par des charges thermiques qui ne varient pas dans le temps. Ces charges comprennent les éléments suivants:

Convections

Radiation

Débits de chaleur

Flux de chaleur (flux de chaleur par unité de surface)

Taux de génération de chaleur (flux de chaleur par unité de volume)

Limites de température constante

Une analyse thermique en régime permanent peut être soit linéaire, avec des propriétés de matériau constantes; ou non linéaire, avec des propriétés de matériau qui dépendent de la température. Les propriétés thermiques de la plupart des matériaux varient avec la température, de sorte que l'analyse est généralement non linéaire. L'inclusion des effets de rayonnement rend également l'analyse non linéaire.

Les rubriques d'analyse thermique en régime permanent suivantes sont disponibles:

Le programme ANSYS gère les trois principaux modes de transfert de chaleur: conduction, convection et rayonnement.

### **6.1. Convection:**

Vous spécifiez la convection comme charge de surface sur des éléments solides conducteurs ou des éléments de coque. Vous spécifiez le coefficient du film de convection et la température du fluide en vrac à une surface; ANSYS calcule ensuite le transfert de chaleur approprié sur cette surface. Si le coefficient de film dépend de la température, vous spécifiez un tableau de températures avec les valeurs correspondantes du coefficient de film à chaque température.

Pour une utilisation dans des modèles d'éléments finis avec des éléments à barres conductrices (qui ne permettent pas une charge de surface de convection), ou dans les cas où la température du fluide en vrac n'est pas connue à l'avance, ANSYS propose un élément de convection nommé LINK34. En outre, vous pouvez utiliser les éléments FLOTRAN CFD pour simuler

les détails du processus de convection, tels que les vitesses des fluides, les valeurs locales du coefficient de film et du flux thermique, et les distributions de température dans les régions fluides et solides.

## **6.2. Radiation:**

Les problèmes de rayonnement, qui ne sont pas linéaires, peuvent être résolus en utilisant l'une de ces méthodes:

En utilisant l'élément de liaison de rayonnement, LINK31

En utilisant des éléments à effet de surface avec l'option rayonnement (SURF151 en modélisation 2-D ou SURF152 en modélisation 3-D)

En générant une matrice de rayonnement dans AUX12 et en l'utilisant comme super-élément dans une analyse thermique.

En utilisant la méthode Radiosity Solver.

Pour des informations détaillées sur ces méthodes, voir Rayonnement.

## **6.3. Effets spéciaux:**

En plus des trois modes de transfert de chaleur, vous pouvez prendre en compte des effets spéciaux tels que le changement de phase (fusion ou congélation) et la génération de chaleur interne (due au chauffage Joule, par exemple). Par exemple, vous pouvez utiliser la masse élémentaire thermique MASS71 pour spécifier des taux de génération de chaleur en fonction de la température.

## **6.4. Éléments de champ lointain:**

Les éléments de champ lointain vous permettent de modéliser les effets de la décroissance en champ lointain sans avoir à spécifier les conditions aux limites supposées à l'extérieur du modèle. Une seule couche d'éléments est utilisée pour représenter un sous-domaine extérieur d'étendue semi-infinie. Pour plus d'informations, voir Éléments de champ lointain dans le Guide d'analyse électromagnétique basse fréquence.

## **7. Structure de base du programme:**

Le traitement des problèmes d'ingénierie comprend généralement trois parties principales: créer un modèle, résoudre le problème, analyser les résultats. ANSYS, comme beaucoup d'autres programmes FE, est également divisé en trois parties principales (processeurs) appelées préprocesseur, processeur de solution, postprocesseur. D'autres logiciels peuvent

contenir uniquement la partie de prétraitement ou uniquement la partie de post-traitement. Au cours de l'analyse, vous communiquerez avec ANSYS via une interface utilisateur graphique (GUI), qui est décrite ci-dessous et illustrée à la figure 1.

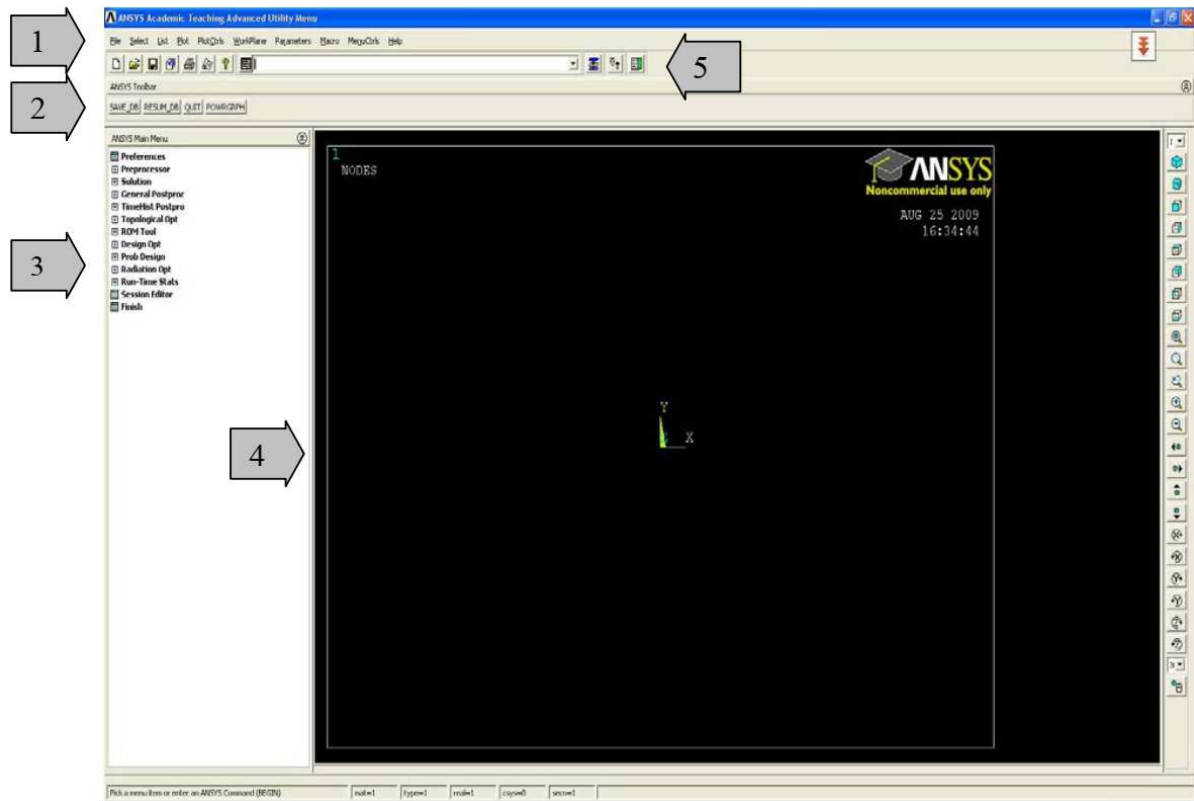


Figure III-1 : L'interface utilisateur graphique (GUI) ANSYS.

1. **Menu Utilitaire:** Ici, vous pouvez accéder et ajuster les propriétés de votre session, telles que les contrôles de fichiers, la liste et les contrôles graphiques.
2. **Barre d'outils:** boutons pour les commandes couramment utilisées.
3. **Menu principal:** Ici vous pouvez trouver les processeurs utilisés lors de l'analyse de votre problème.
4. **Fenêtre graphique:** Dans la fenêtre graphique, votre modèle est affiché: géométrie, éléments, visualisation des résultats et ainsi de suite.
5. **Fenêtre de saisie:** vous pouvez saisir des commandes dans la fenêtre de saisie.

### 7.1. Préprocesseur:

Dans le préprocesseur, le modèle est configuré. Il comprend généralement un certain nombre d'étapes dans l'ordre suivant:

- **Construisez la géométrie.** Selon que la géométrie du problème est une, deux ou trois dimensions, la géométrie consiste à créer des lignes, des zones ou des volumes.

Ces géométries peuvent ensuite, si nécessaire, être utilisées pour créer d'autres géométries par l'utilisation d'opérations booléennes. L'idée clé lors de la construction de la géométrie comme celle-ci est de simplifier la génération du maillage d'élément. Par conséquent, cette étape est facultative mais la plus souvent utilisée. Les nœuds et les éléments peuvent cependant être créés à partir de coordonnées uniquement.

- **Définissez les matériaux.** Un matériau est défini par ses constantes de matériau. Chaque élément doit se voir attribuer un matériau particulier.

- **Générer un maillage d'élément.** Le problème est discrétisé avec des points nodaux. Les nœuds sont connectés pour former des éléments finis, qui forment ensemble le volume du matériau. En fonction du problème et des hypothèses formulées, le type d'élément doit être déterminé. Les types d'éléments courants sont les éléments fermes, poutres, plaques, coques et solides. Chaque type d'élément peut contenir plusieurs sous-types, par ex. Solide 2D à 4 nœuds, éléments solides 3D à 20 nœuds. Par conséquent, des précautions doivent être prises lorsque le type d'élément est choisi.

Le maillage d'élément peut dans ANSYS être créé de plusieurs manières. Le moyen le plus courant est qu'il est créé automatiquement, cependant plus ou moins contrôlé. Par exemple, vous pouvez spécifier un certain nombre d'éléments dans une zone spécifique, ou vous pouvez forcer le générateur de maillage à conserver une taille d'élément spécifique dans une zone. Certaines formes ou tailles d'éléments ne sont pas recommandées et si ces limites ne sont pas respectées, un avertissement sera généré dans ANSYS. Il appartient à l'utilisateur de créer un maillage capable de générer des résultats avec un degré de précision suffisant.

### **7.2. Processeur de solution:**

Ici, vous résolvez le problème en rassemblant toutes les informations spécifiées sur le problème:

- **Appliquer des charges:** les conditions aux limites sont généralement appliquées aux nœuds ou aux éléments.

La quantité prescrite peut par exemple être la force, la traction, le déplacement, le moment, la rotation. Les charges peuvent également être modifiées à partir du préprocesseur dans ANSYS.

- **Obtenir la solution:** La solution au problème peut être obtenue si l'ensemble du problème est défini.

### 7.3. Post-processeur:

Dans cette partie de l'analyse, vous pouvez par exemple:

- **Visualisez les résultats:** par exemple, tracez la forme déformée de la géométrie ou des contraintes.
- **Lister les résultats:** il est possible de lister les résultats sous forme de listes tabulaires ou de fichiers imprimés.

## 8. Modélisation Thermo-mécanique de la plaque FGM:

la modélisation se fait sur deux phases essentielles, la première est phase thermique et la deuxième c'est la phase mécanique (structurel). Dans ce qui suit on va aborder les étapes principale de cette modélisation.

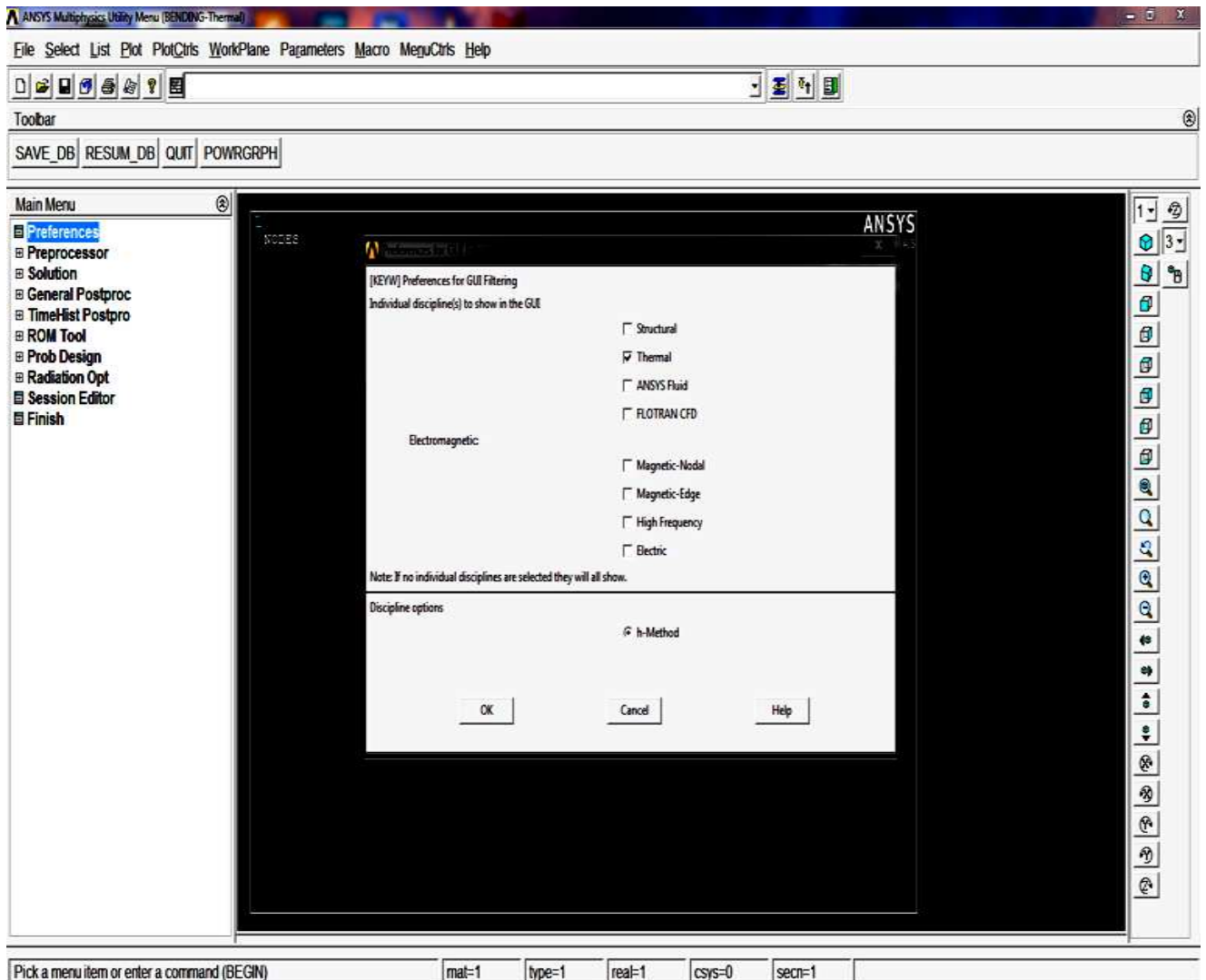


Figure III-2 : Choix de la préférence (étude) thermique.

Après le choix de la préférence en premier lieu pour une étude thermique, on détermine le type d'élément, et qui sera un élément solide de type SOLID278.

### 8.1. Description de l'élément solide thermique (SOLID278):

SOLID278 Thermal Solid convient à la modélisation de la conduction thermique solide 3-D générale. Il permet des dégénérescence prismatique et tétraédrique lorsqu'il est utilisé dans des régions irrégulières. SOLID278 est conçu pour être un élément compagnon pour SOLID185.

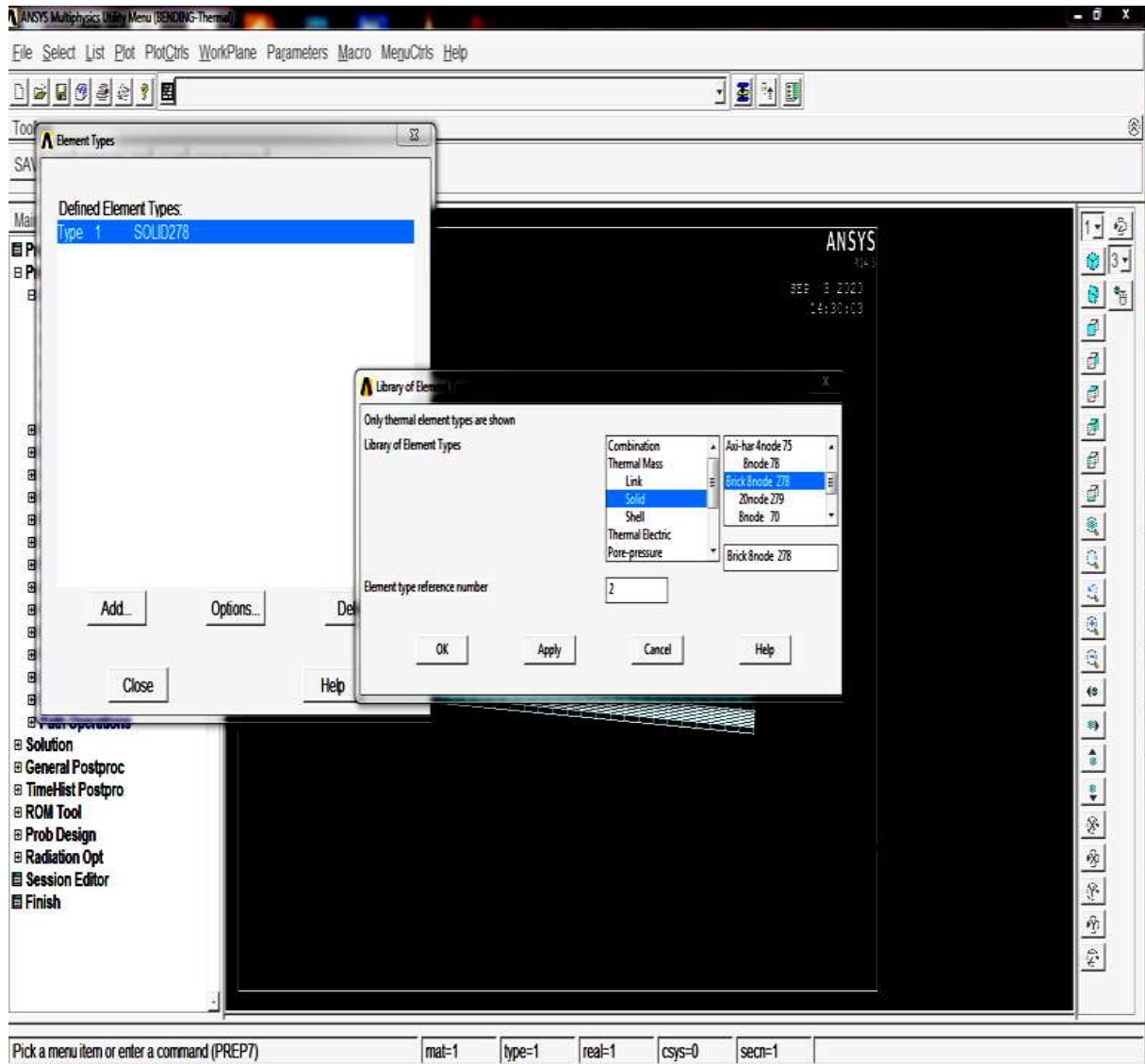


Figure III-3 : Définir le type d'élément SOLID278.



La géométrie et les emplacements des nœuds de cet élément sont indiqués dans la Figure III-4. L'élément est défini par huit nœuds et les propriétés du matériau orthotrope. Le système de coordonnées d'élément par défaut est le long des directions globales. Vous pouvez définir un système de coordonnées d'élément à l'aide d'ESYS, qui constitue la base des directions de matériaux orthotropes (à savoir, pour la conductivité thermique). La chaleur et la densité spécifiques sont ignorées pour les solutions en régime permanent. Les propriétés ne saisissent pas la valeur par défaut, comme décrit dans Propriétés du matériau linéaire dans la référence de matériau [48].

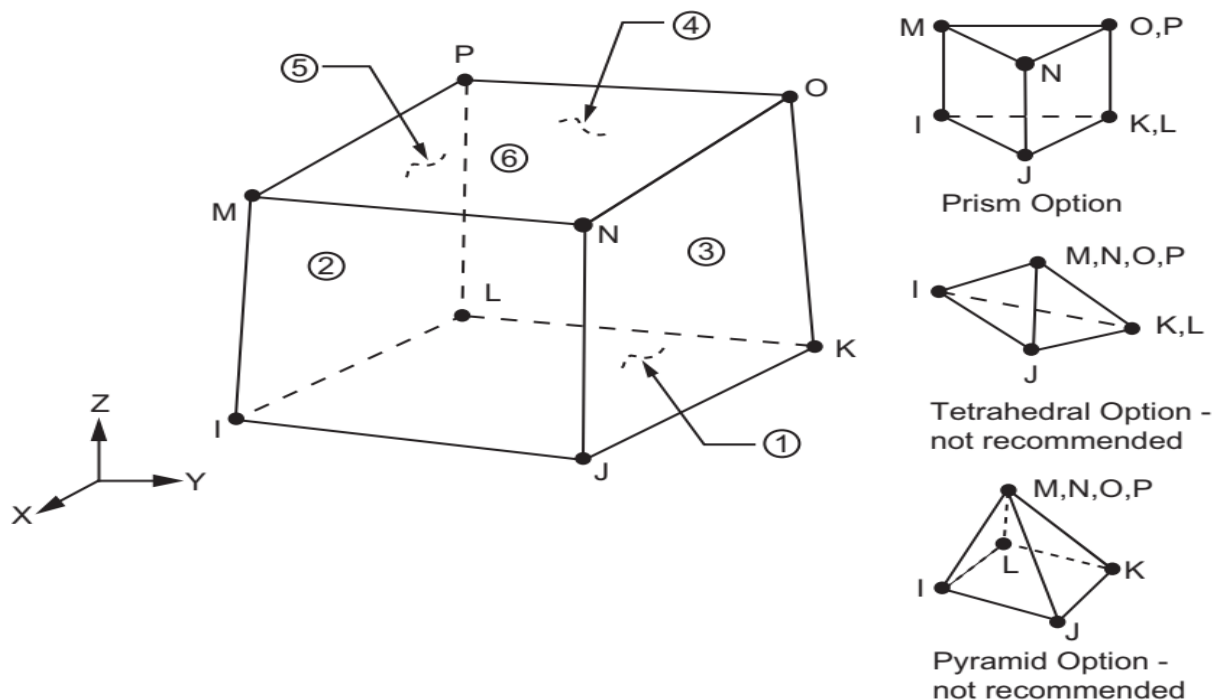


Figure III-4 : Géométrie de l'élément solide thermique homogène SOLID278 [48].

## 8.2. Les Dimensions et le Maillage:

les dimension de la plaque FGM modéliser est montré dans les figure III-1, les dimensions de la plaque est : ( $a=30.5$  cm ,  $b=30.5$  cm ,et  $h=1.27$  cm). L'épaisseur de la plaque est divisée a dix (10) sous couches, pour la variation des propriétés de la plaque FGM (figure III-5-6).

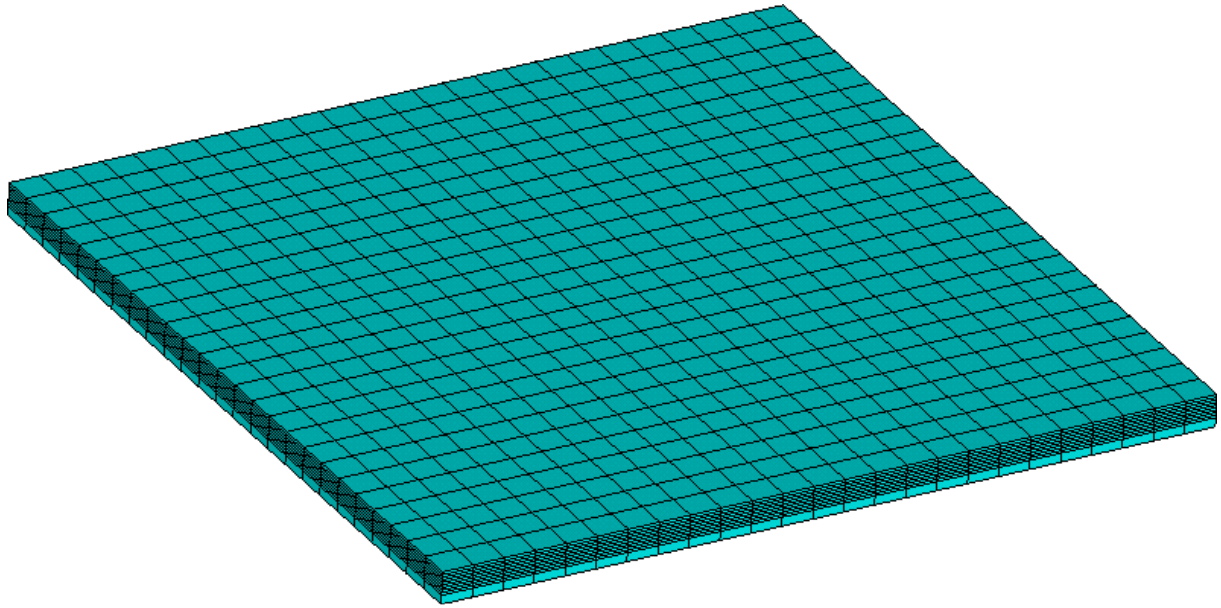


Figure III-5 : plaque FGM carrée.

	ép= 1.146 mm ; %AL=50; %HDPE=50%	
	ép= 1 mm ; %AL=40.99; %HDPE=59.01%	
	ép= 1 mm ; %AL=33.98; %HDPE=66.02%	
	ép= 1 mm ; %AL=27.62; %HDPE=72.38%	
	ép= 1 mm ; %AL=21.83; %HDPE=78.17%	
	ép= 1 mm ; %AL=16.54; %HDPE=83.46%	
	ép= 1 mm ; %AL=11.68; %HDPE=88.32%	
	ép= 1 mm ; %AL=7.22; %HDPE=92.78%;	
	ép= 1 mm ; %AL=3.1 ; %HDPE=96.9 %	
	ép= 3.554 mm ; %HDPE=100%	

Figure III-6: Détails de la division de l'épaisseur de la plaque.

### 8.3. Material Models:

L'unité de la température peut être désignée par la commande par:  
Preprocessor → Material Props → Temperature Units → Celsius

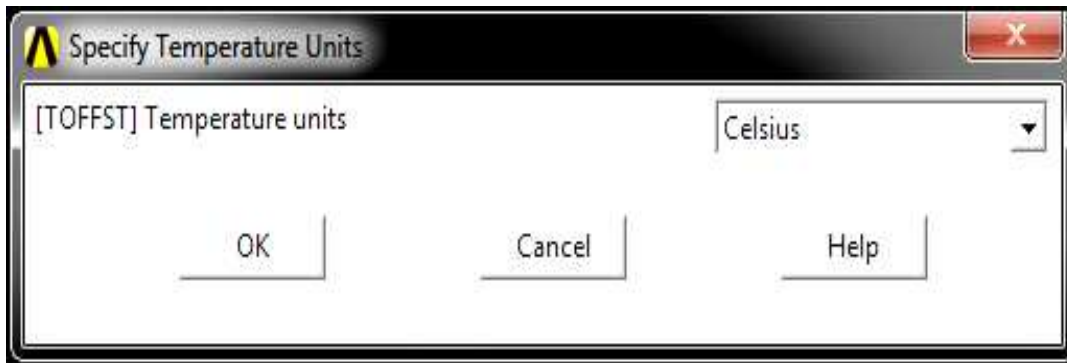


Figure III-7 : Spécifier l'unité de la température.

Les valeurs des caractéristiques mécaniques et thermiques sont introduite en APDL , et cela pour les changement de ces caractéristiques suivant l'épaisseur de la plaque FGM. Pour cette raison l'épaisseur est divisé à dix (10) sous épaisseur suivant les résultats expérimentale ( voir figure III-6 et 7).

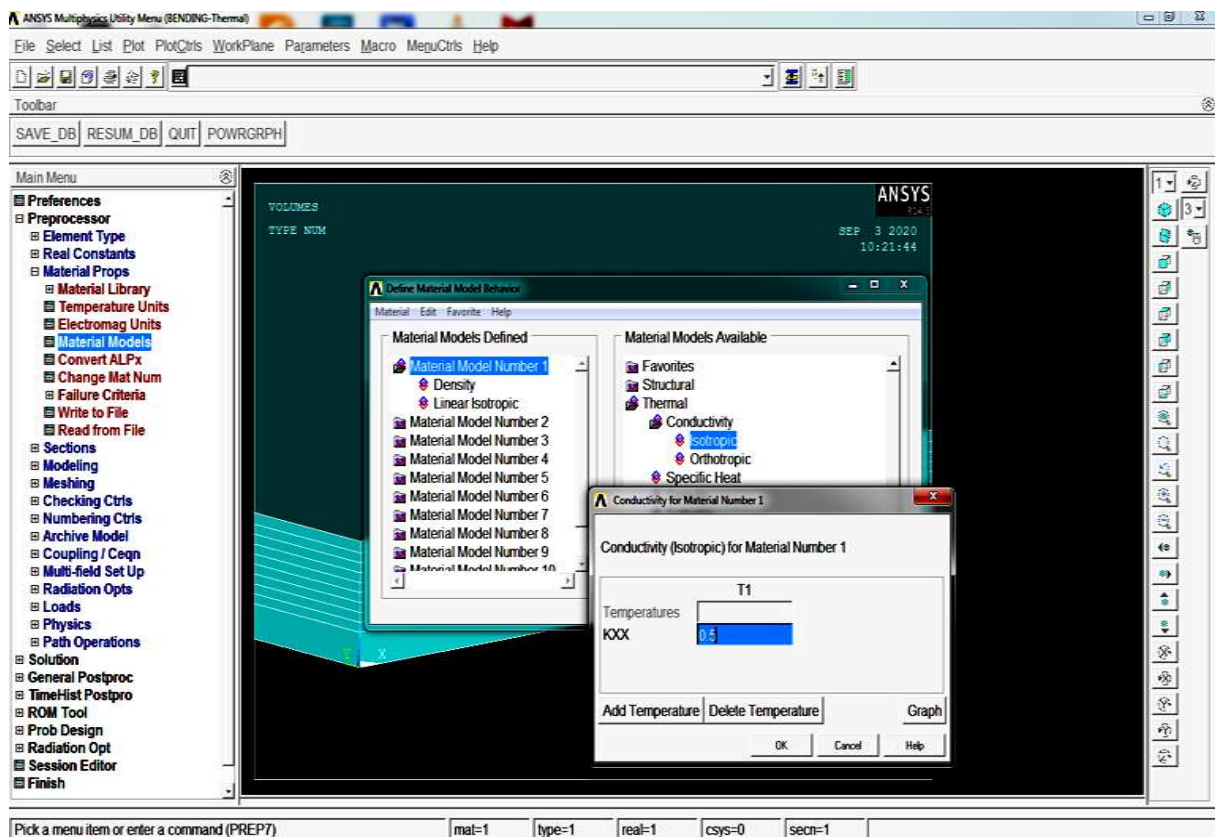


Figure III-8 : Définir le modèle de comportement des matériaux et les valeurs.

Les sous couches (épaisseurs) de la plaque FGM est considéré comme un matériaux isotrope et homogène. On introduit pour chaque couche les propriétés structurel (E: module de young,  $\nu$ : coefficient de poisson , et  $\rho$ : la densité), et les propriétés thermique ( $\lambda$ :conductivité).

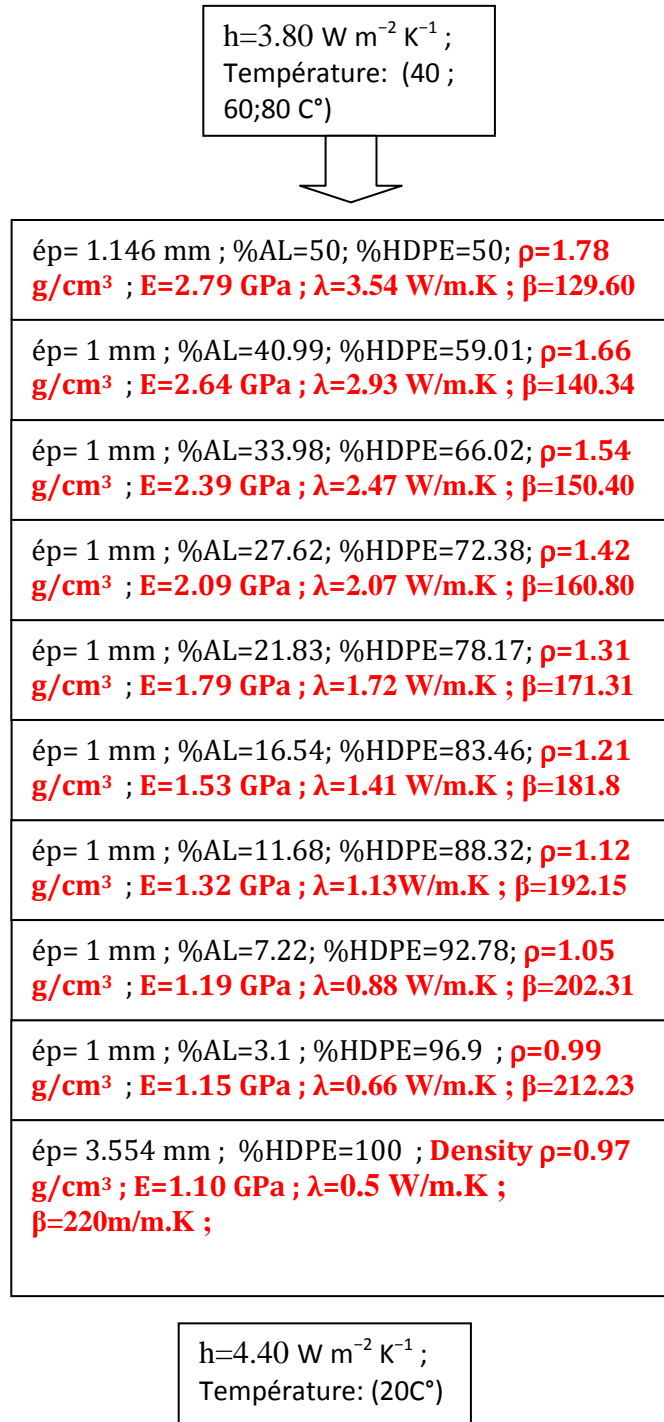


Figure III-9 : Caractéristiques mécaniques et thermiques suivant l'épaisseur du FGM.

$\lambda$  :est la conductivité thermique

$\beta$  : Coefficient de dilatation thermique

$h$  : coefficient de transfert de chaleur par convection (Film coefficient)  
la température à appliquée est de  $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $T=60^{\circ}\text{C}$ , et  $T=80^{\circ}\text{C}$  (Bulk temperature)

Après affectation des propriétés de matériaux pour chaque couche, vient l'étape des conditions aux limites, principalement le chargement thermique par convection, ou on doit définir la valeur du Film coefficient (coefficient de transfert de chaleur par convection), et la valeur du Bulk temperature (température à appliquée).

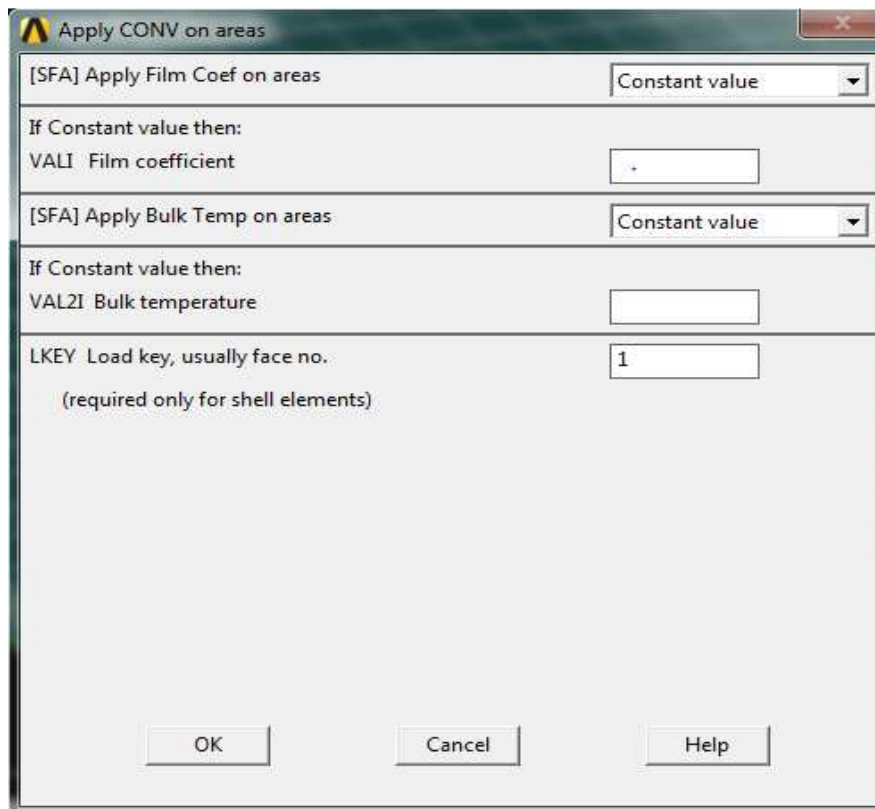


Figure III-10 : Valeurs appliquées sur les surface supérieure et inférieure de la plaque.

Les chargement de température par convection sont appliquées sur les faces supérieure et inférieure de la plaque, ou la face supérieure de la plaque FGM est composé de (%AL=50; %HDPE=50) on applique la température la plus grande (élevées).

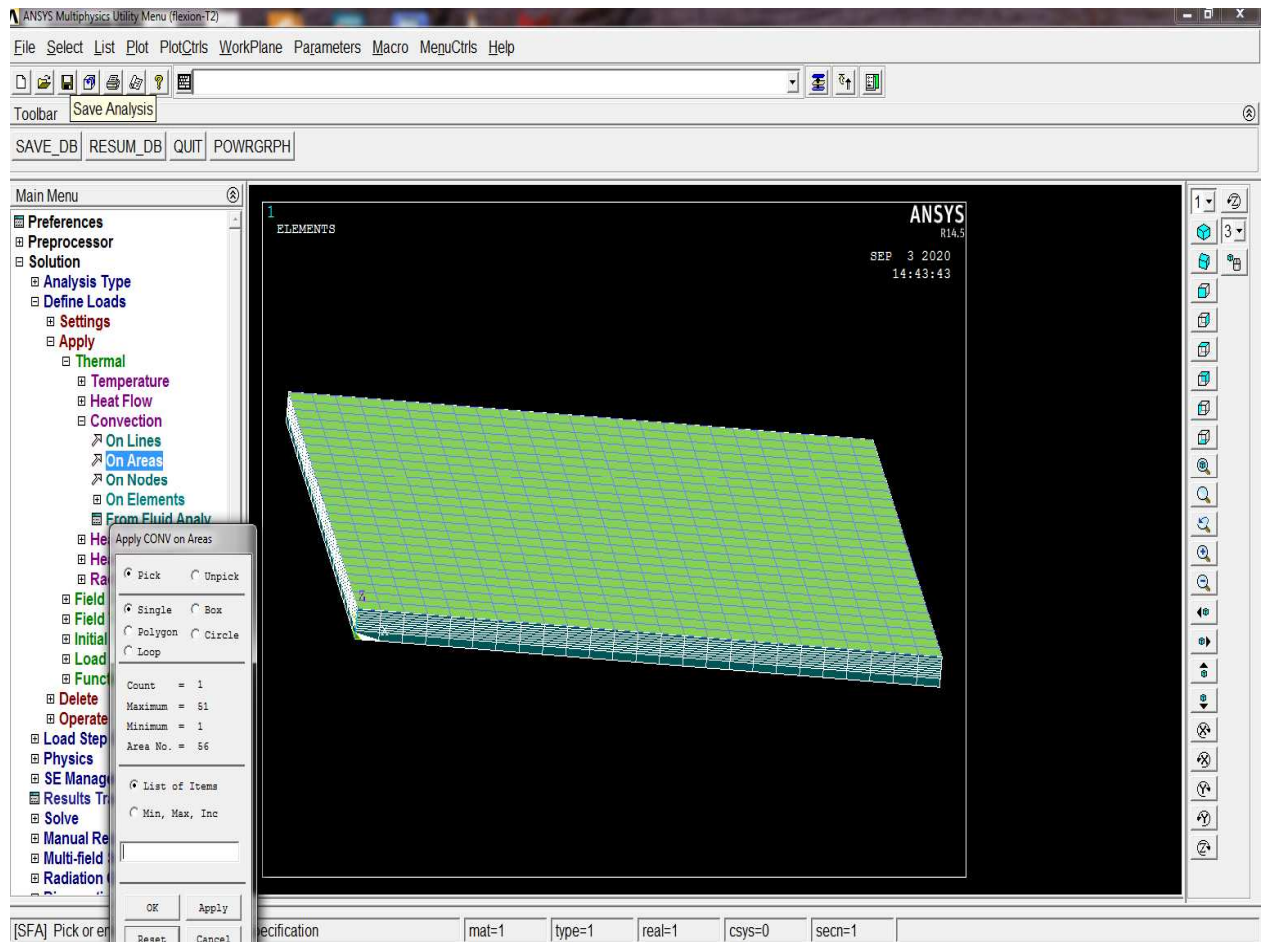


Figure III-11 :

Le Transfer de type d'élément ce fait après avoir terminer l'étape de l'étude thermique, de l'élément SOLID278 à l'élément SOLID185 pour l'étude structurel comme il est expliqué dans la figure III-12et III-13.

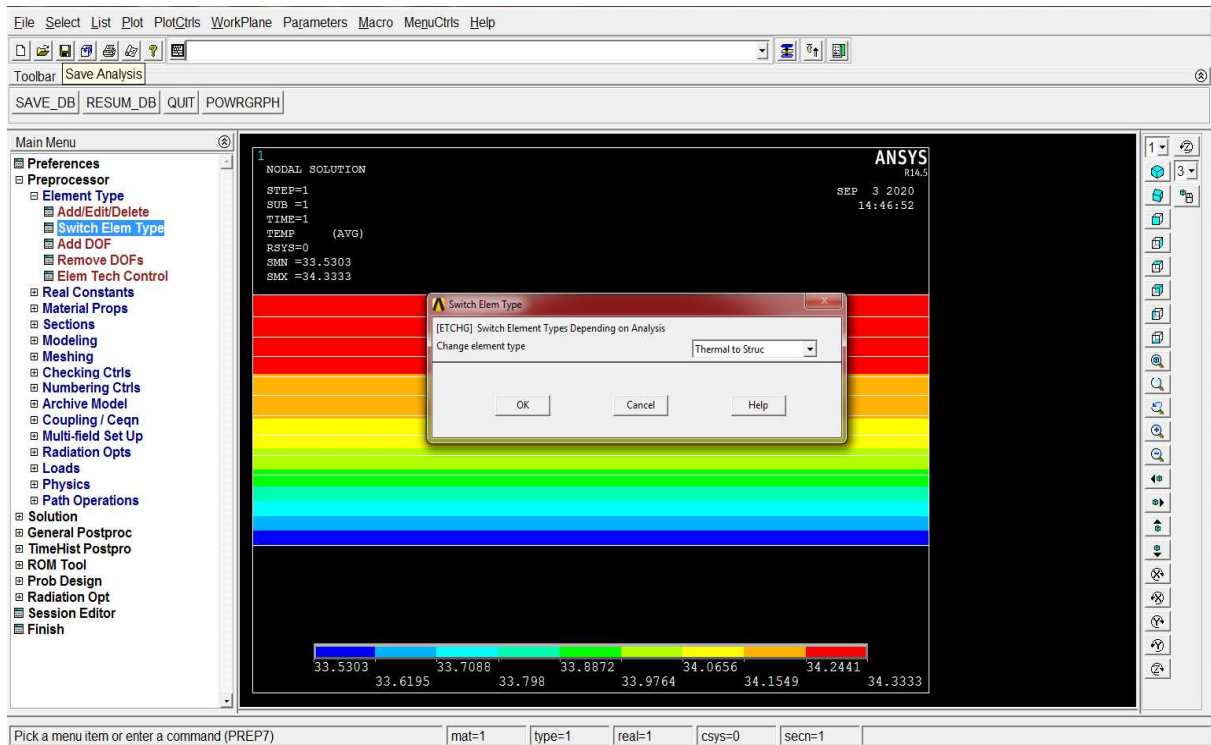


Figure III-12 :Transfer du type d'élément du thermique au structurel.

Description de l'élément SOLID185:

SOLID185 est utilisé pour la modélisation 3D de structures solides. Il est défini par huit nœuds ayant trois degrés de liberté à chaque nœud. SOLID185 Structural Solid convient à la modélisation de structures solides 3D générales. Il permet la dégénérescence des prismes, des tétraédriques et des pyramides lorsqu'il est utilisé dans des régions irrégulières [48].

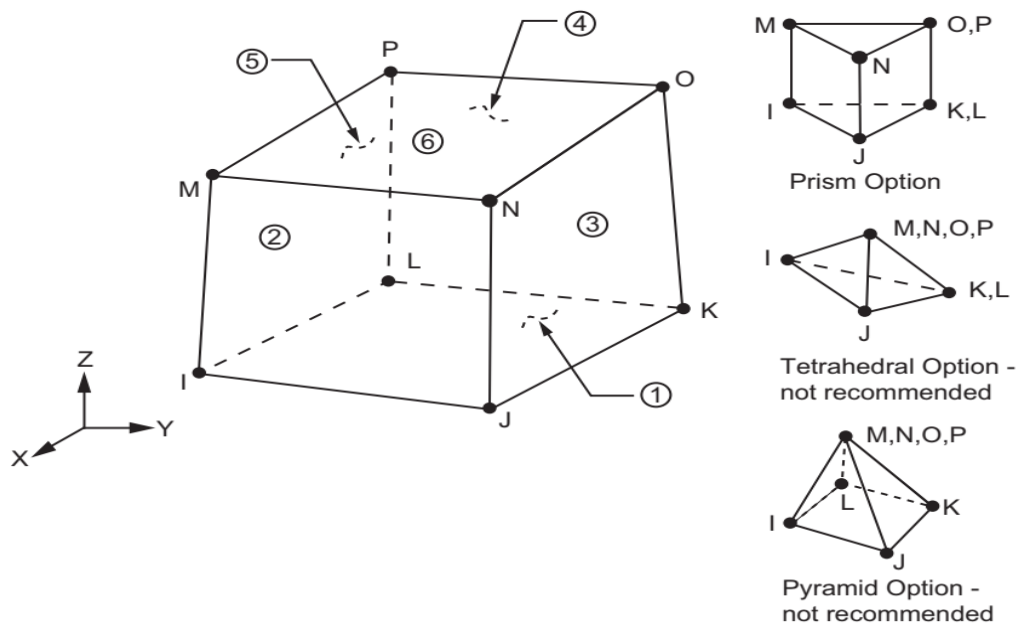


Figure III-13: géométrie de l'élément solid185 [48].



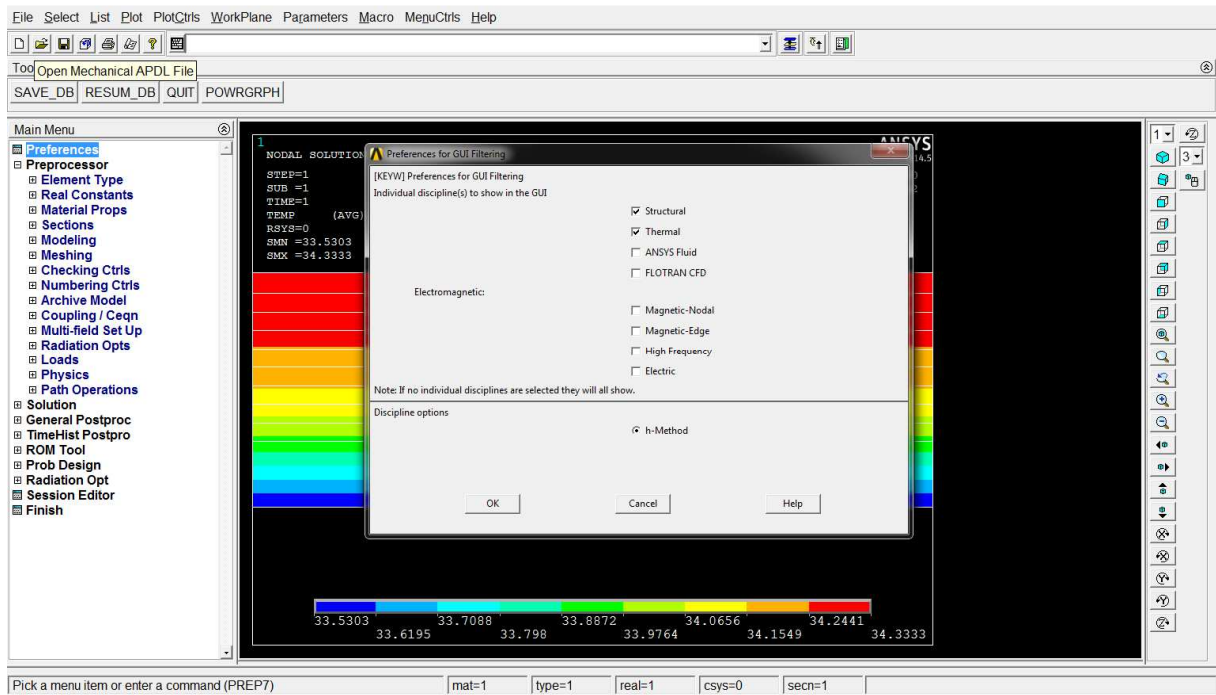


Figure III-14: Choix de la préférence du calcul structural.

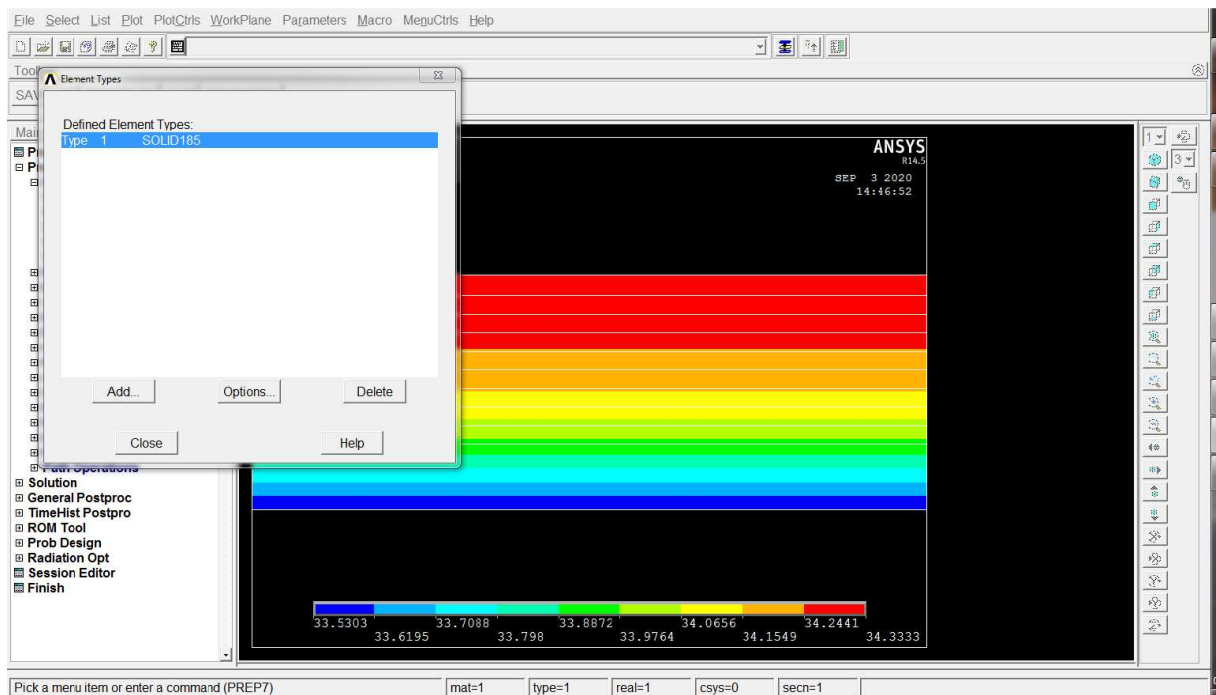


Figure III-15 : Type d'élément pour l'étude structural.



### 8.4. Conditions aux limites et chargement:

La plaque de FGM est simplement appuyée sur les quatre bords. Un Bord simplement appuyé Si le bord  $x = a$  de la plaque est simplement appuyé, la flèche le long de ce bord est nulle. En plus, ce bord peut tourner librement autour de l'axe  $x$  c'est à dire qu'il n'existe pas de moment de flexion  $M_x$  le long de ce bord. Comme la flèche  $w$  est identiquement nulle le long du côté, ses dérivées en  $y$  le sont également et l'on a les conditions suivantes :

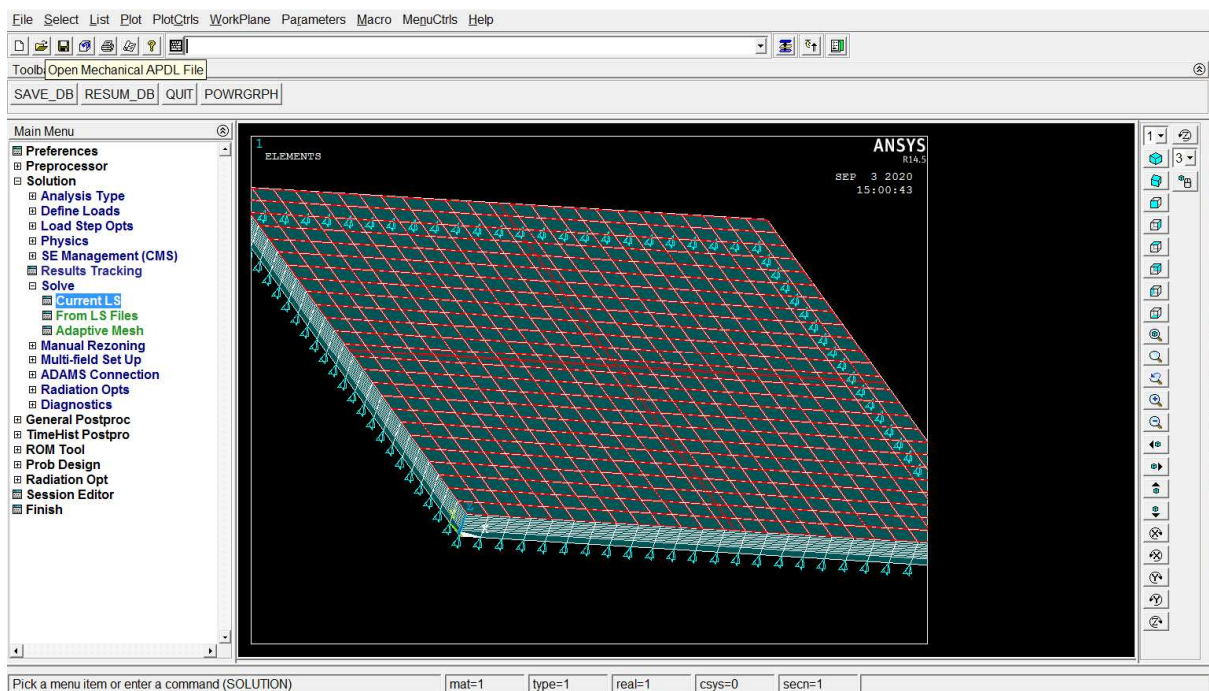


Figure III-16 :Conditions aux limites de plaque FGM.

La plaque est sous une charge uniformément répartie quasi-statique de valeur différents (100Pa , 200Pa, 300Pa, 400Pa, et 500Pa). Après la résolution on aura la plaque déformer en flexion (figure III-16).

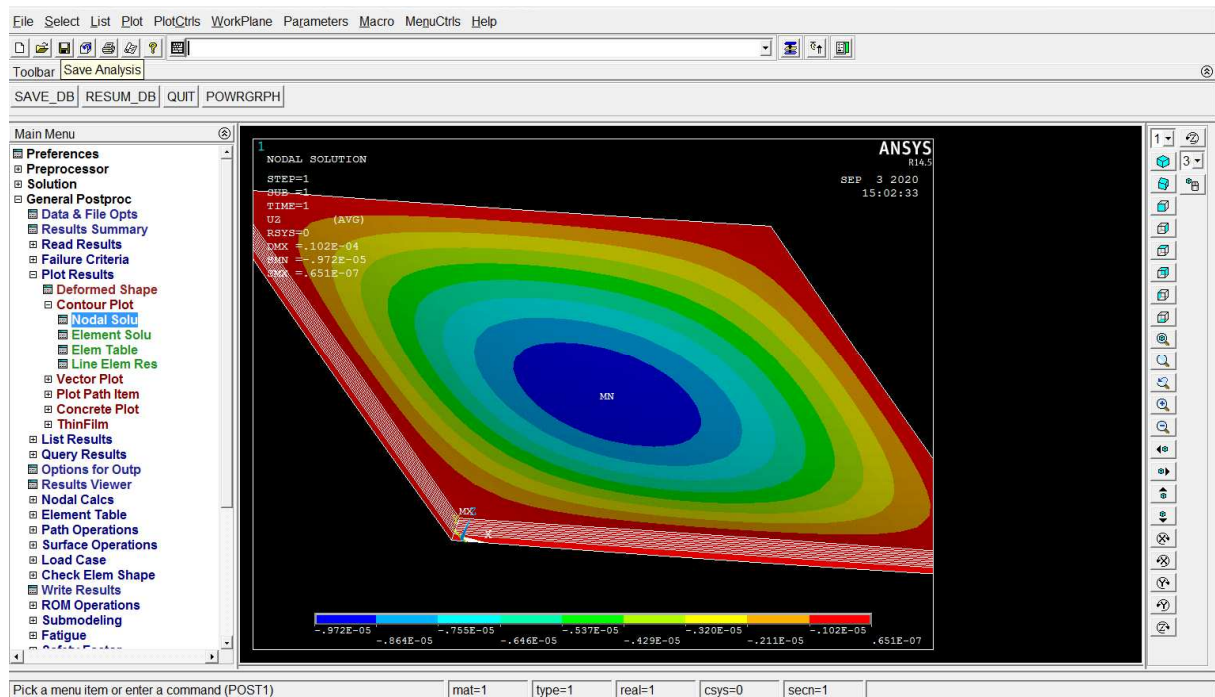


Figure III-17 : Déformation de flexion suivant l'axe UZ.

## 9. Conclusion:

Le programme ANSYS est un outil d'analyse puissant et polyvalent qui peut être utilisé dans une grande variété de disciplines d'ingénierie. APDL (*ANSYS Parametric Design Language*, C'est le langage de programmation utilisé par les logiciels de calcul par éléments finis d'Ansys). *ANSYS classique* est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

# **Chapitre IV :**

# **Résultats et**

# **discussions**

## Chapitre IV : Résultats et discussions

### 1. Introduction:

Dans ce chapitre on va présenter et discuter les résultats de la modélisation de la plaque FGM avec deux dimensions carrée ( $a \times b$ ) et rectangulaire ( $2a \times b$ ) sous des charges uniformément réparties. Les résultats présentés ci dessous est celle d'une analyse statique et une analyse thermomécanique, afin de vérifier l'effet de la température sur la déflexion de la plaque FGM.

### 2. Résultats:

Dans ce qui suit on va essayer d'exposer les résultats de la modélisation de la plaque FGM simplement appuyées sur les quatre bords en flexion sous différents chargement réparties uniformément avec une analyse statique et une analyse thermomécanique:

#### 2.1. Analyse Statique:

Les résultats de l'analyse statique présentés sont pour des charges uniformément répartie de (100Pa , 200Pa, 300 Pa ,400Pa , et 500Pa).

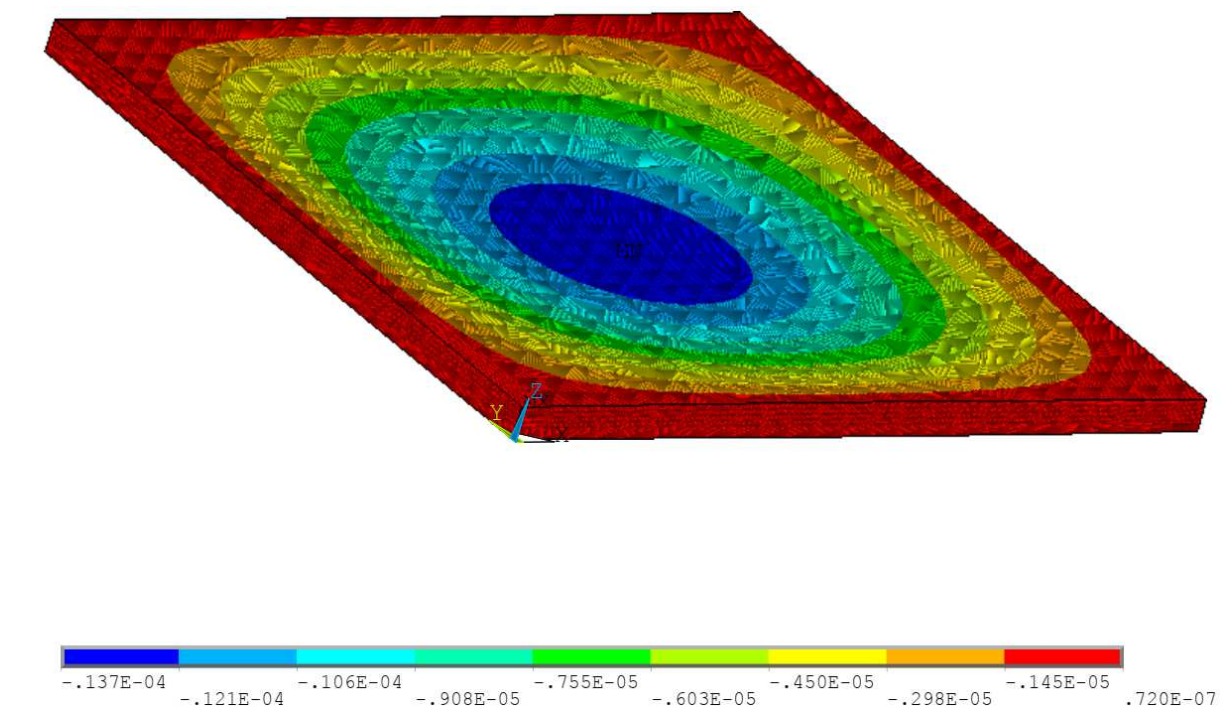


Figure IV-1: Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM ( $a \times b$ ), sous une charge réparties  $P=100Pa$ .

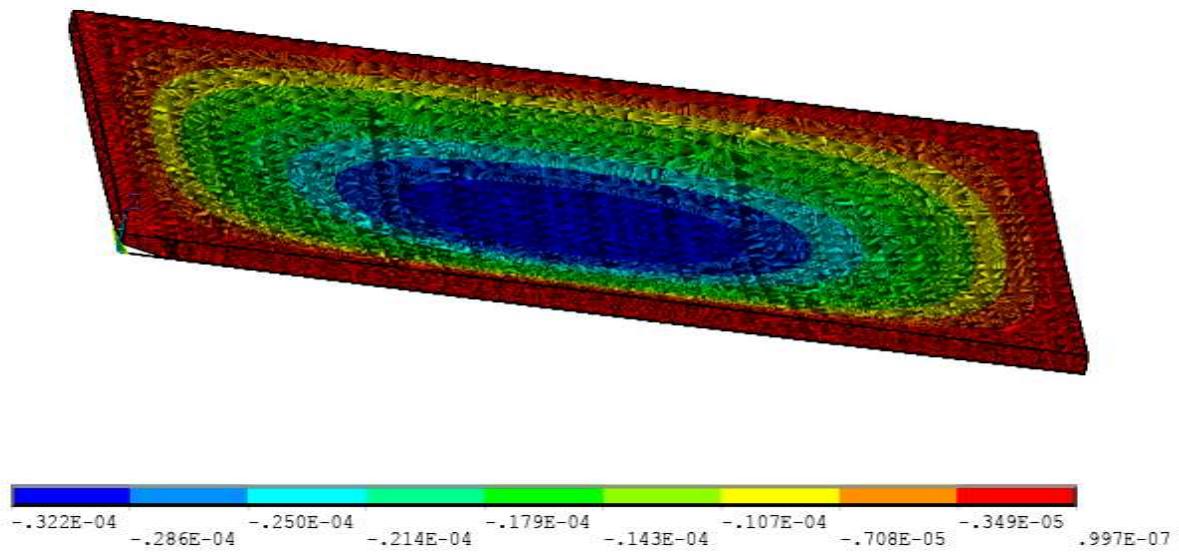


Figure IV-2: Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM (2axb), sous une charge réparties P=100Pa.

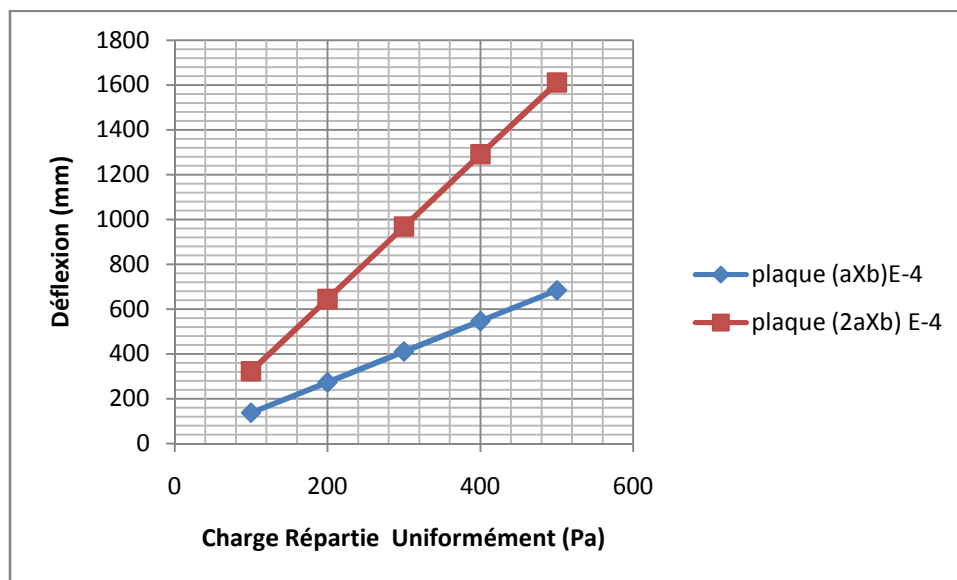


Figure IV-3: Courbe déflexion chargement pour une analyse statique.

Suivant l'augmentation de l'intensité de la charge la déflexion augmente, pour la plaque rectangulaire la déflexion est plus importante par rapport à une plaque carrée.



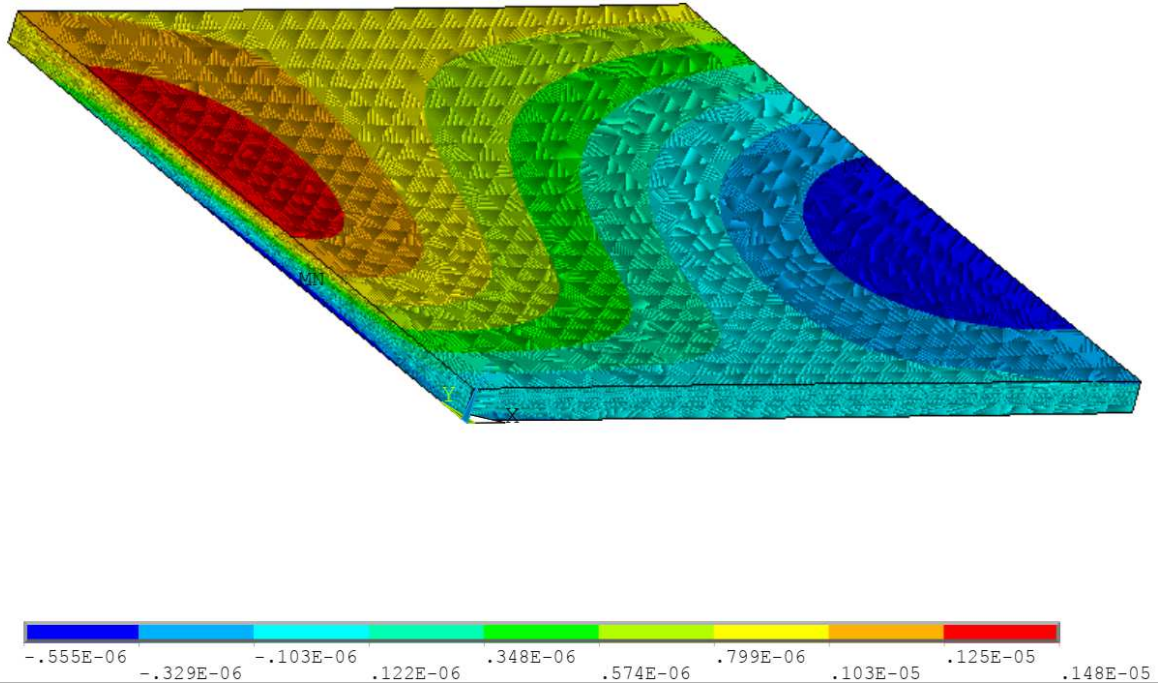


Figure IV-4: Déplacement suivant l'axe UX d'une plaque FGM (axb), sous une charge réparties P=100Pa.

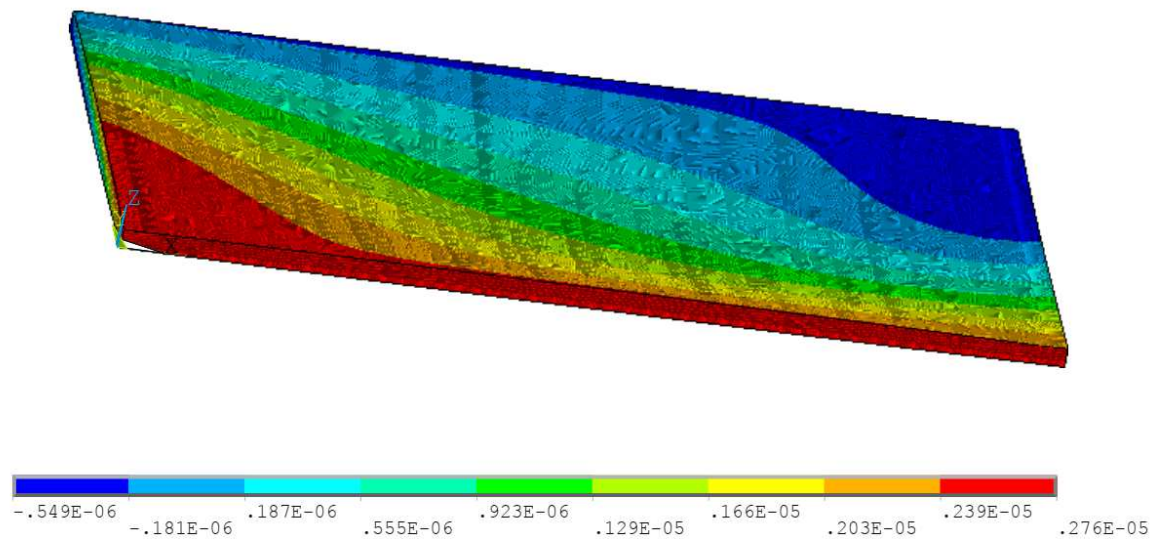


Figure IV-5: Déplacement suivant l'axe UX d'une plaque FGM (2axb), sous une charge réparties P=100Pa.

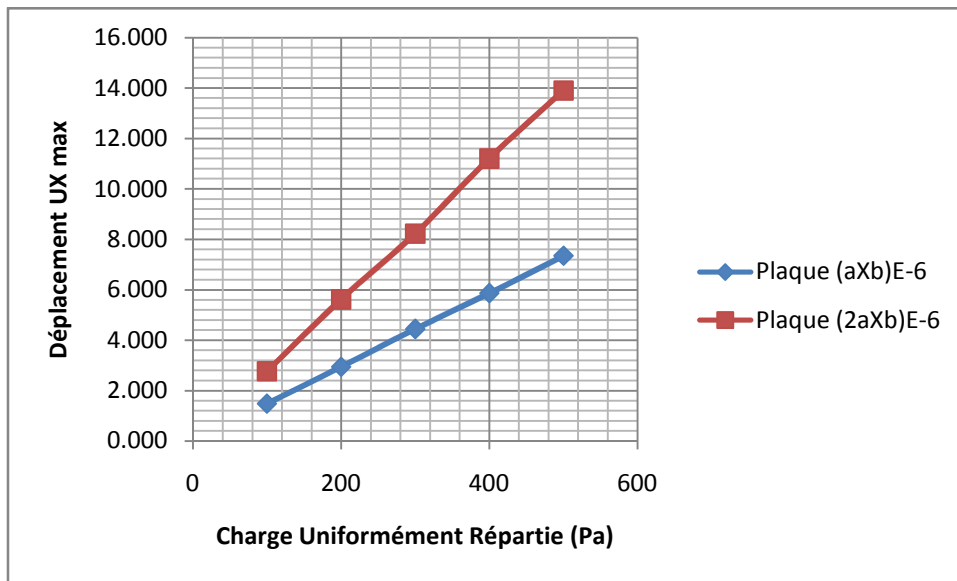


Figure IV-6: Courbe Déplacement UX chargement pour une analyse statique.

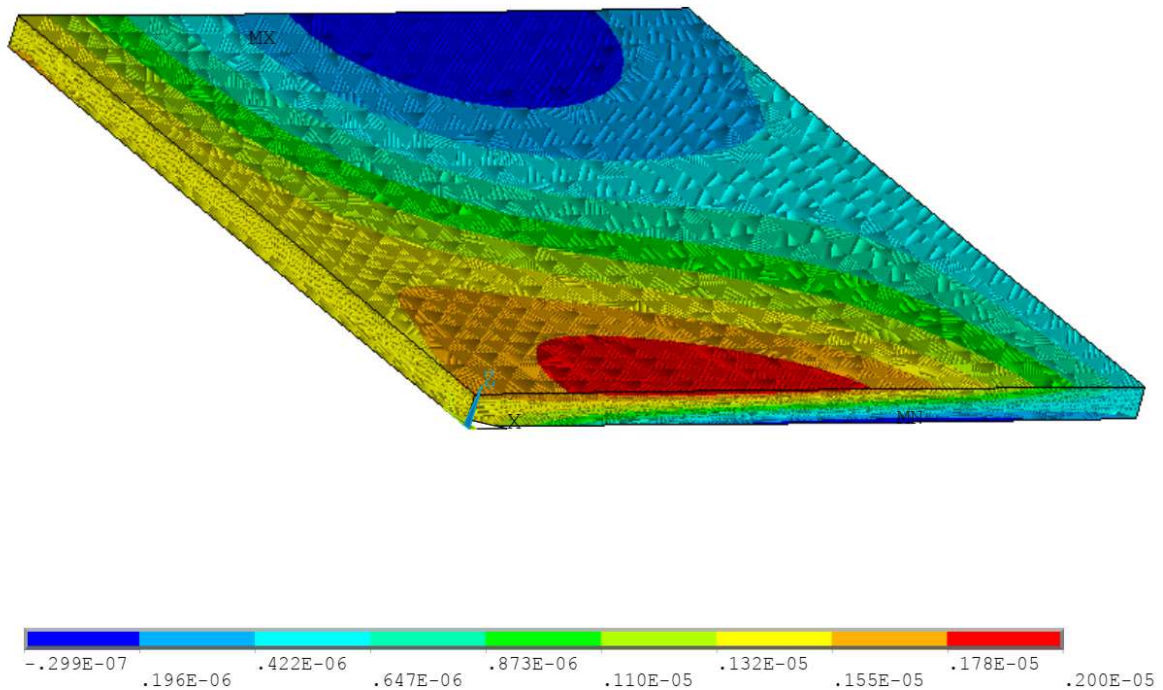


Figure IV-7: Déplacement suivant l'axe UY d'une plaque FGM (axb), sous une charge réparties P=100Pa.

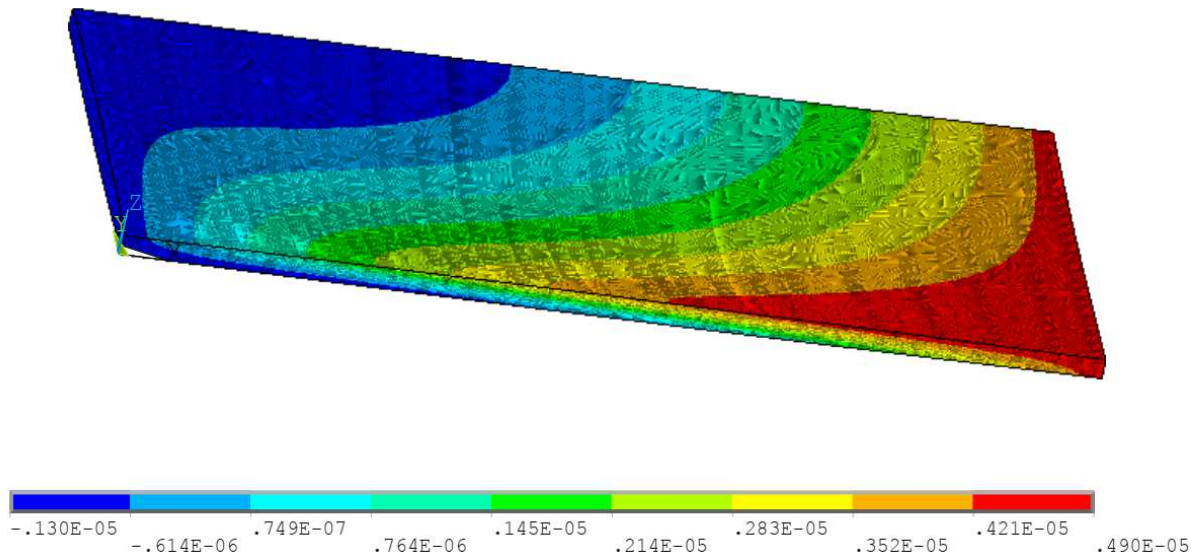


Figure IV-8: Déplacement suivant l'axe UY d'une plaque FGM (2axb), sous une charge réparties P=100Pa.

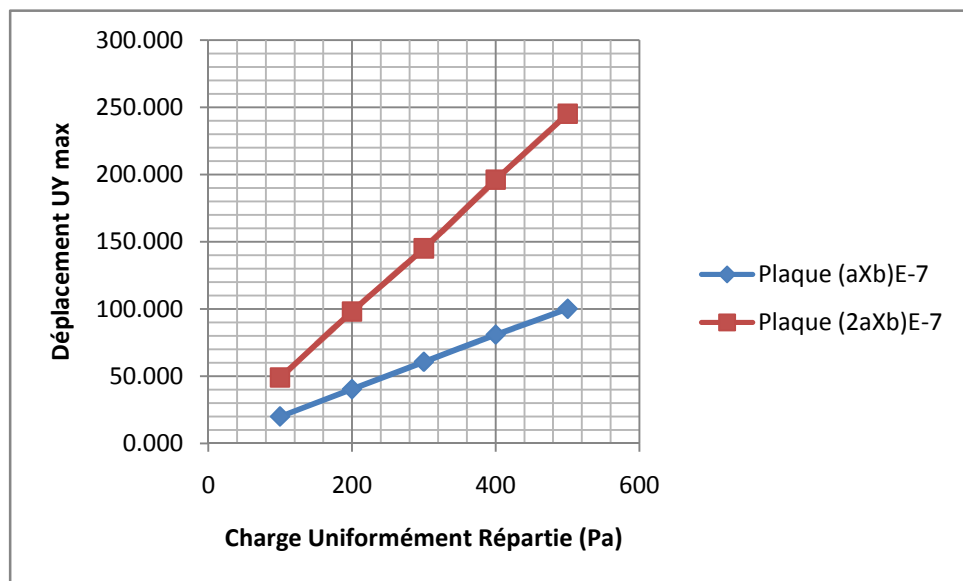


Figure IV-9: Courbe Déplacement UY chargement pour une analyse statique.

Les déplacement transversale (UX ,UY) sont très petit par rapport à la déflexion, et les déplacement pour une plaque (2axb) est plus grandes par rapport à une plaque (axb).



## 2.2. Analyse Thermomécanique:

Les résultats de l'analyse thermique sont utilisés pour calculer les champs de déplacement, de contrainte et de déformation dus à la dilatation thermique différentielle.

La figure IV-10,11,12 ci dessous présente la température au niveau de chaque sous épaisseur pour des différentes températures appliquées sur la surface supérieure.

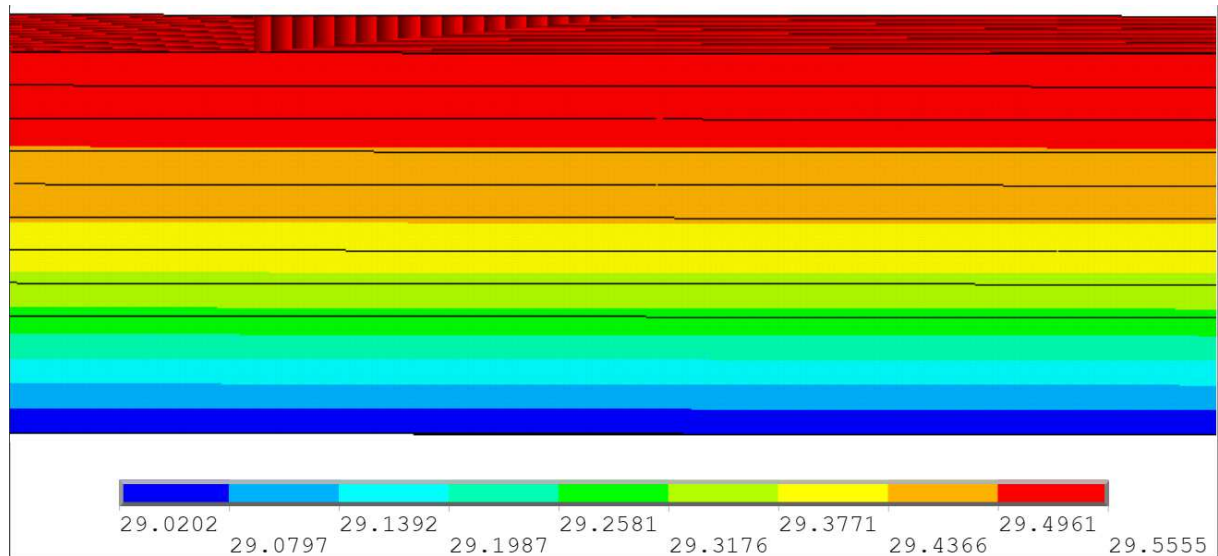


Figure IV-10: Température nodale pour 40C°.

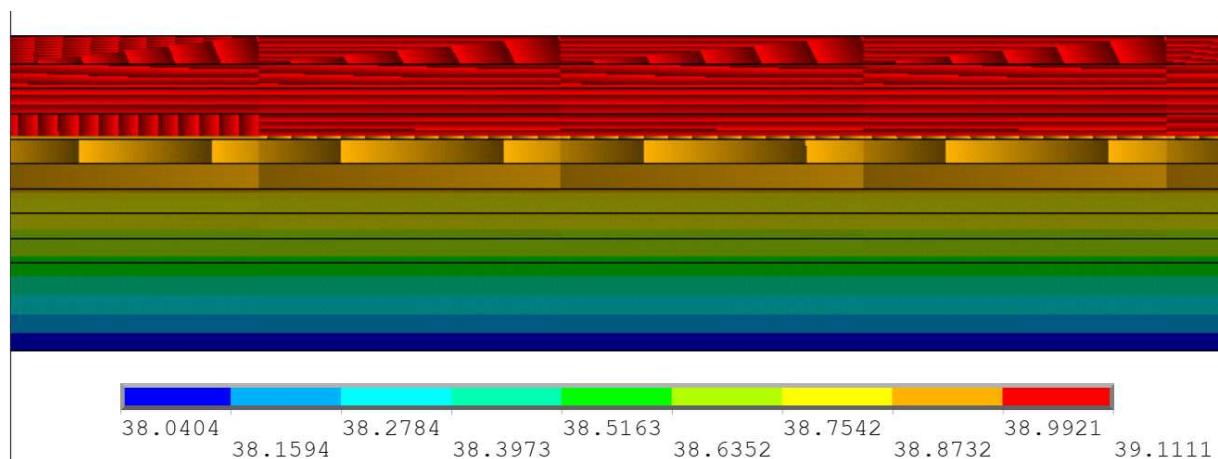


Figure IV-11: Température nodale pour 60C°.

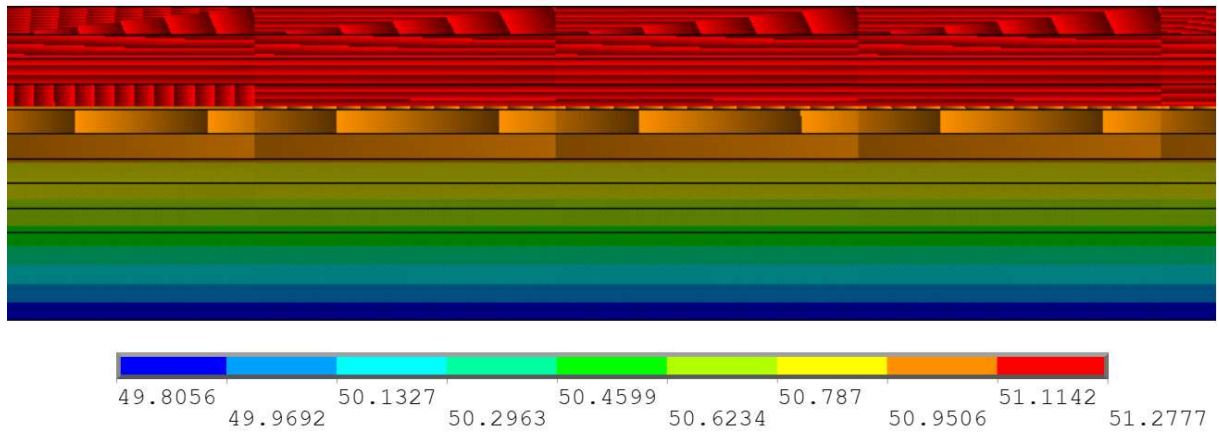


Figure IV-12: Température nodale pour 80C°.

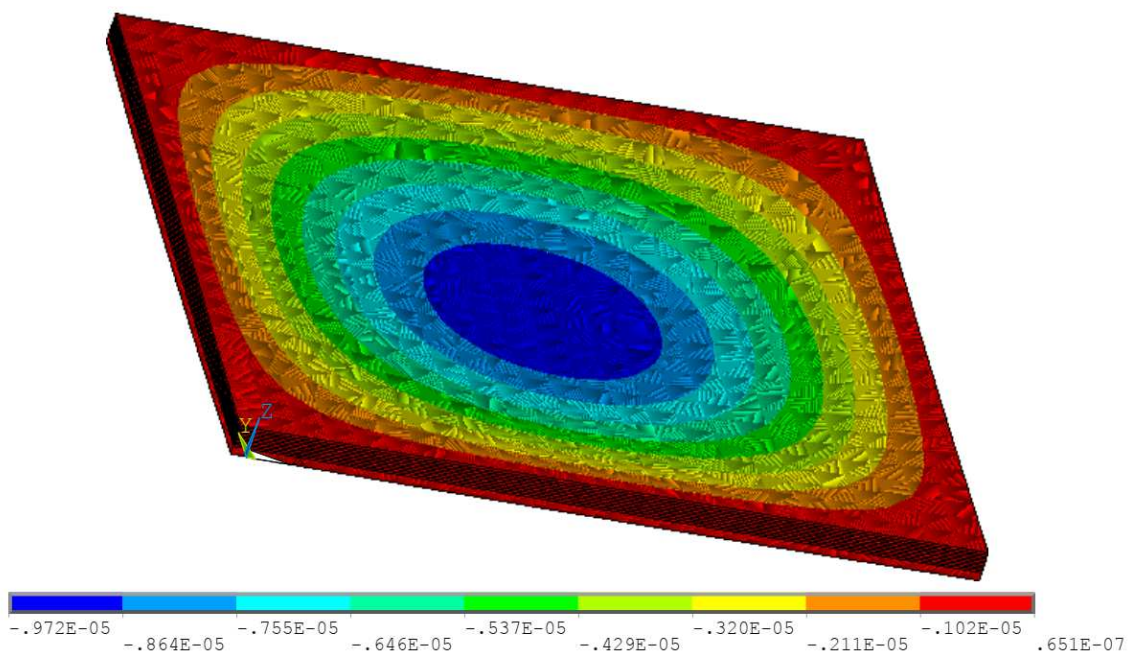


Figure IV-10: Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM (axb), sous une température 40C° et une charge réparties P=100Pa.

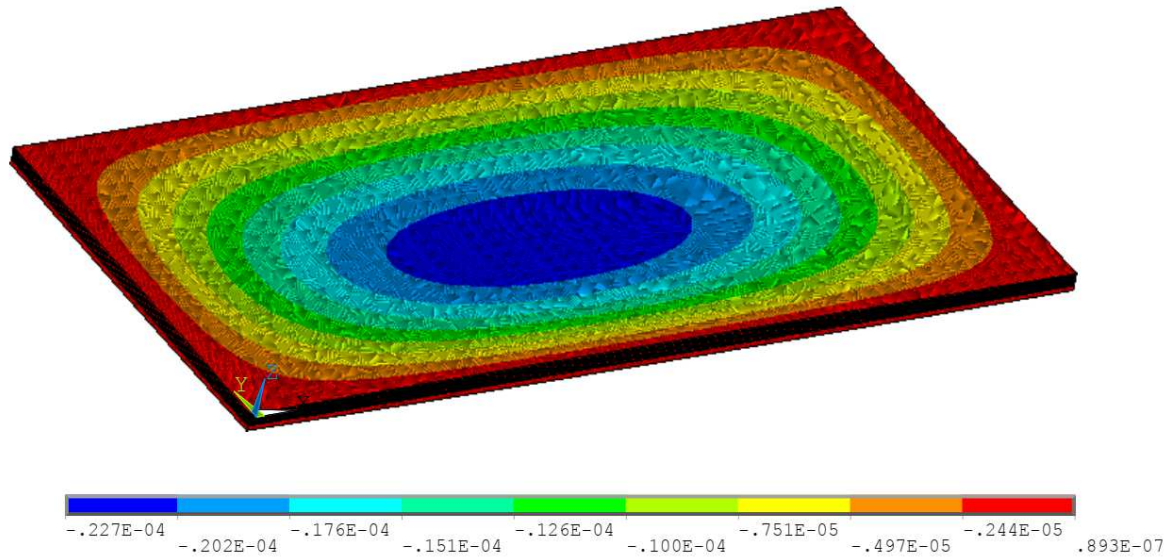


Figure IV-11: Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM (2axb), sous une température 40C° et une charge réparties P=100Pa.

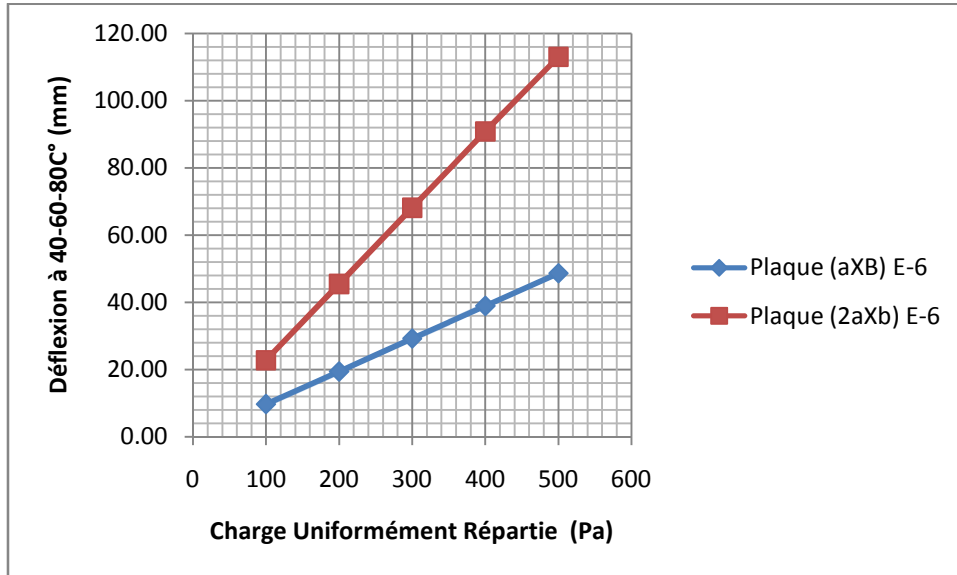


Figure IV-12: Courbe déflexion chargement sous une température de (40-60-80C°) pour une analyse thermomécanique.

Tableau IV-1: Déplacement suivant l'axe UZ d'une plaque FGM (2axb) pour une analyse thermomécanique.

	Pression (Pa)	100	200	300	400	500
40C°	W=UZ (a=b) mm10 <sup>-6</sup>	9.72	19.40	29.20	38.90	48.60
	W=UZ (a=2b) mm10 <sup>-6</sup>	22.70	45.40	68.10	90.80	113.00
60C°	W=UZ (a=b) mm10 <sup>-6</sup>	9.72	19.40	29.20	38.90	48.60
	W=UZ (a=2b) mm10 <sup>-6</sup>	22.70	45.40	68.10	90.80	113.00
80C°	W=UZ (a=b) mm10 <sup>-6</sup>	9.72	19.40	29.20	38.90	48.60
	W=UZ (a=2b) mm10 <sup>-6</sup>	22.70	45.40	68.10	90.80	113.00

Les Déflexion obtenue présentés dans le tableau IV-1, montre que les résultats restent même pour une plaque (axb) ou une plaque (2axb) ne change pas malgré le changement de la température appliquée, et ces résultats sont très petit par rapport à l'analyse statique.

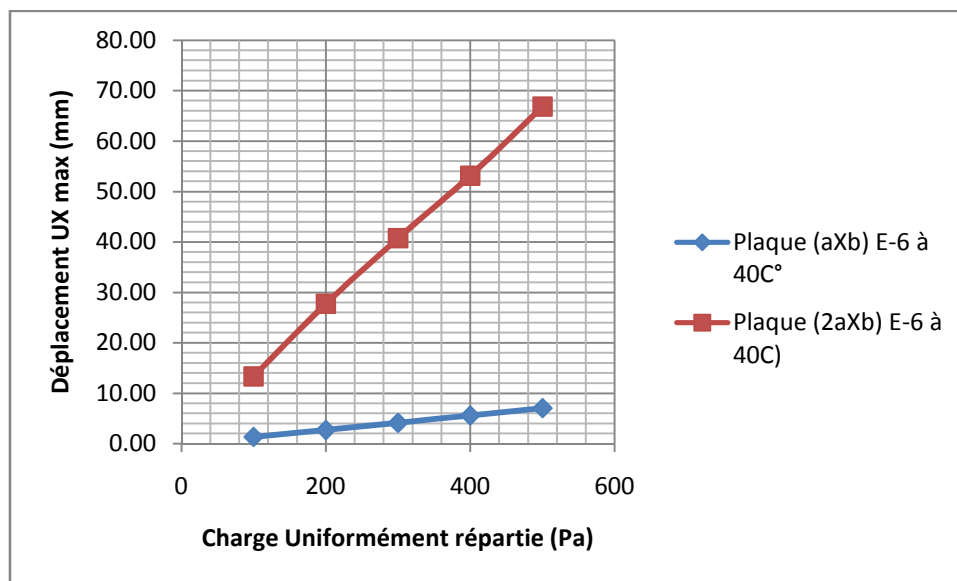


Figure IV-13: Courbe Déplacement UX chargement à 40C°.

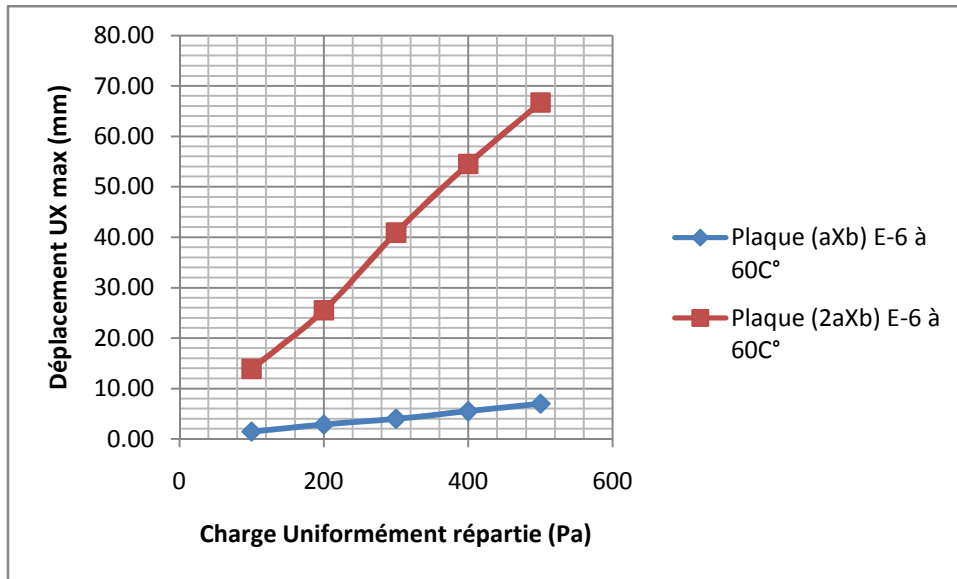


Figure IV-14: Courbe Déplacement UX chargement à 60°C.

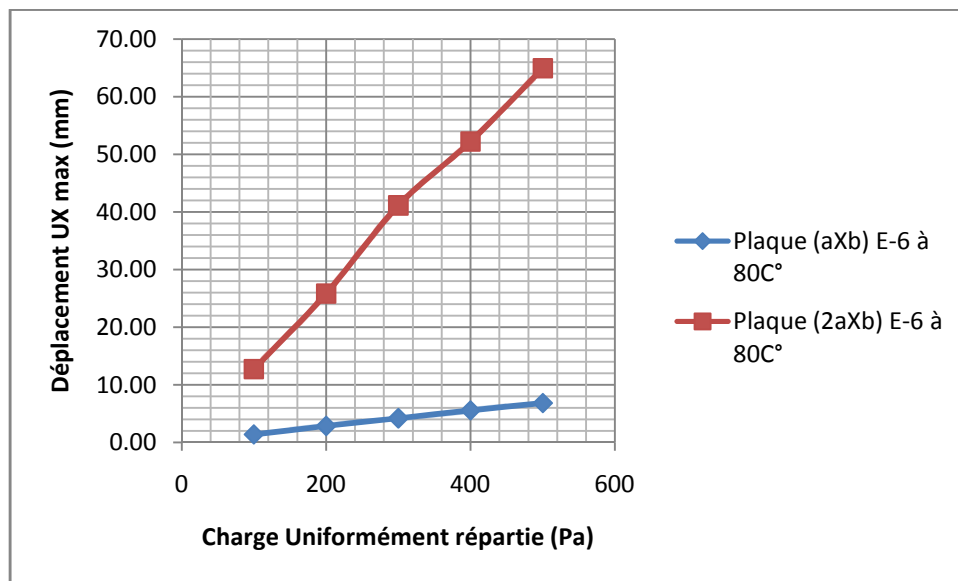


Figure IV-15: Courbe Déplacement UX chargement à 80°C.

Pour les déplacements transversaux ( $UX$  et  $UY$ ) changent avec de petites variations quand on change la température, mais il y a une grande différence qui peut atteindre dix fois entre la plaque carrée et la plaque rectangulaire, voir les Figures IV-13,14,15 pour les déplacements  $UX$  et les figures IV-16,17,18 pour les déplacements  $UY$ .

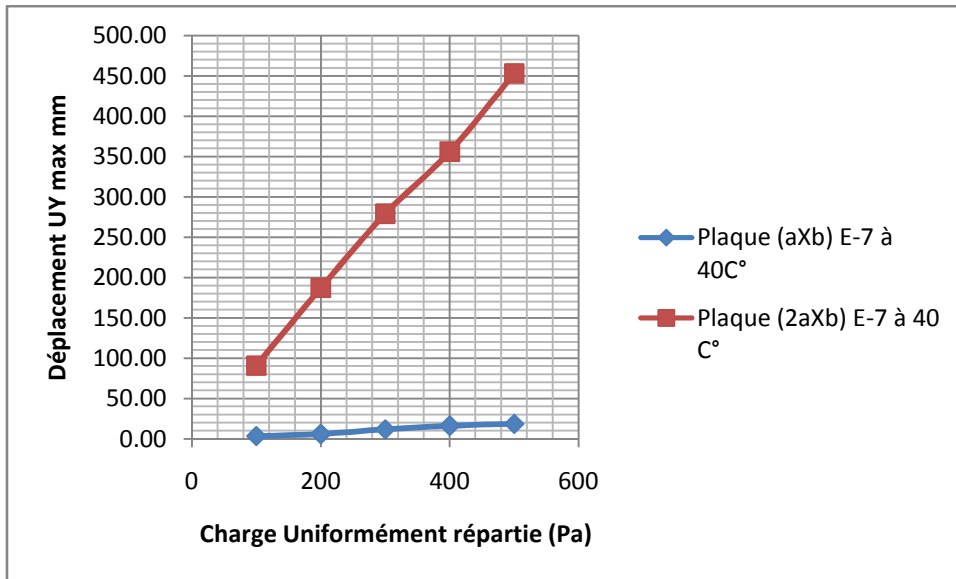


Figure IV-16: Courbe Déplacement UY chargement à 40C°.

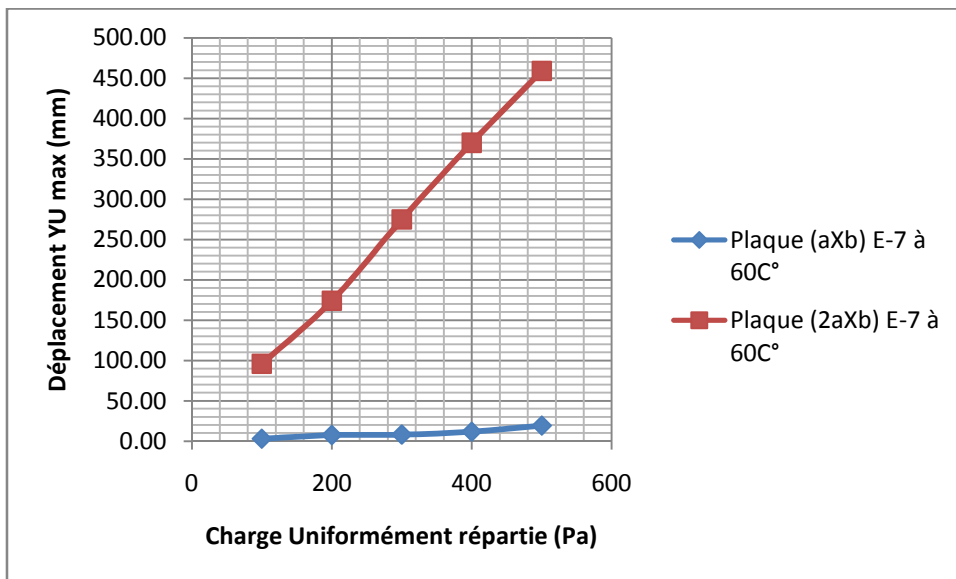


Figure IV-17: Courbe Déplacement UY chargement à 60C°.

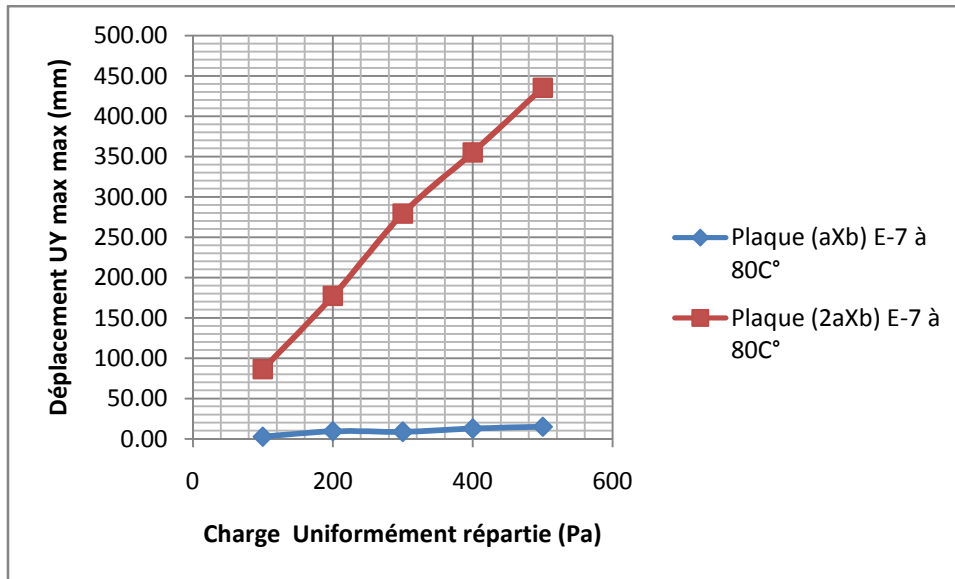


Figure IV-18: Courbe Déplacement UY chargement à 80°C.

### 3. Conclusion:

Les déflexions obtenues par une analyse statique est plus importantes par rapport aux déflexions obtenues par une analyse thermomécanique. Dans une plaque rectangulaire les déflexion sont plus grand qu'une plaque carrée.

**Conclusion**

**Générale**



## Conclusion Générale

Les matériaux à gradient de propriétés fonctionnelle à base Aluminium / Polyéthylène à haute densité attaché avec une cellule solaire photovoltaïque (PV) sont utilisés comme un composant essentiel d'une enveloppe de bâtiment multifonctionnelle à haute performance pour l'efficacité énergétique et la durabilité.

L'étude du comportement thermomécanique de la plaque FGM par la modélisation au biais du logiciel ANSYS, pour étudier les déformations à la flexion en plus des chargement mécanique, les conditions thermique sont pris en considération.

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude du comportement thermomécanique des plaques FGM carrées et rectangulaires, sous appuis simples aux quatre bords et avec un chargement uniformément répartie.

Dans l'étude bibliographie on a montré que ce type de matériaux FGM avec la méthode de fabrication par sédimentation donne comme résultats un matériaux FGM avec des caractéristiques structurelle différent aux types de FGM ou on trouve que les faces supérieure et inférieure sont composé d'un matériaux 100% du même types et distingue de l'autre face. Ce n'est pas le cas de ce type de FGM ou on trouve dans une face le HDRE à 100% et l'autre face c'est un mélange à 50% Al et 50% HDPE.

L'étude paramétrique menée a démontré que le type d'analyse de la plaque FGM soit statique ou une analyse thermomécanique à une influence sur l'ordre de grandeur des résultats obtenues.

La géométrie de la plaque représentée carrée ou rectangulaire, le type de la charge thermique, et le chargement mécanique ont une très grande influence sur déformations en flexion.

Le comportement thermomécanique des structures à la flexion est intimement lié à la forme géométrique, aux propriétés des matériaux constituants, aux conditions aux limites. Ainsi les gradients de propriétés des matériaux jouent un rôle important dans la détermination de la réponse des plaques FGM

En perspective, il est prévu d'étudier ce type de plaque FGM sous différentes conditions aux limites et chargement, en plus d'une étude analytique avec des théories et modèles d'ordre élevé.

**Références**

**Bibliographiques**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: Niino M., Hirai T. and Watanabe R. (1987), "The functionally gradient materials," *J Jap Soc Compos Mat*, vol.13, pp. 257-264.
- [2]: Jha, D.K. , Tarun Kant , R.K. Singh. (2013), "A critical review of recent research on functionally graded plates". *Composite Structures* 96 , 833–849.
- [3]: Atai, A. A. , Nikranjbar, A. and Kasiri, R. (2012) "Buckling and post-buckling Behaviour of semicircular functionally graded material arches: a theoretical study," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* , vol. 226, pp. 607-614.
- [4]: Wang S. S. (1983) "Fracture mechanics for delamination problems in composite materials," *Journal of Composite Materials* , vol. 17(3), pp. 210-223.
- [5]: P. Shanmugavel, G. B. Bhaskar, M. Chandrasekaran, P. S. Mani and S. P. Srinivasan, "An overview of fracture analysis in functionally graded materials," *European Journal of Scientific Research*, vol.68 No.3 (2012), pp. 412-439.
- [6]: EL-Wazery, M. S. , EL-Desouky , A. R. , (2015), "A review on Functionally Graded Ceramic-Metal Materials". *Mater. Environ. Sci.* 6 (5) 1369-1376.
- [7]: Cho, J.R. , Tinsley Oden, J. (2000) , "Functionally graded material: a parametric study on thermal-stress characteristics using the Crank±Nicolson±Galerkin scheme". *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 188, 17±38.
- [8]: Zhu H.X., Abbaschian R. (2000), "Microstructures and properties of in-situ NiAl–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> functionally gradient composites", *Compos. Part B* 31 383–390.
- [9]: Kieback B., Neubrand A., Riedel H. (2003), "Processing techniques for functionally graded materials". *Materials Science and Engineering A362* ,81–105.
- [10]: Koizumi, M. (1993) "The concept of FGM", *Ceramic Transactions* 34,3–11.
- [11]: Shabana Y.M. and Noda N. (2001), "Thermo-elasto-plastic stresses in functionally graded materials subjected to thermal loading taking residual stresses of the fabrication process into consideration", *Composites Part B* 32, 111–121.

## Références Bibliographiques

---

- [12]: Shailendra Kumar Bohidar, Ritesh Sharma, Prabhat Ranjan Mishra, (2014) , "Functionally Graded Materials: A Critical Review". *International Journal of Research (IJR)* Vol-1, Issue-7, August ISSN 2348-6848
- [13]: Kawasaki, A. , Watanabe, R. , (1997) " Concept and P/M Fabrication of Functionally Gradient Materials". *Ceramics International* 23 ,73-83.
- [14]: Naebe, M., Shirvanimoghaddam, K. (2016) ,"Functionally graded materials: A review of fabrication and properties" , *Applied Materials Today* 5 223–245.
- [15]: Udupa G. , Shrikantha Rao S., Gangadharan K. V. (2014), "Functionally graded composite materials: An overview", *Procedia Materials Science* 5 1291 – 1299
- [16]: Mahamood, R.M. and Titilayo Akinlabi E.( 2017), "Functionally Graded Materials, Types of Functionally Graded Materials and Their Areas of Application (chapter2)", *Springer International Publishing AG, Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*, DOI 10.1007/978-3-319-53756-6\_2
- [17]: Bharti, I., N. Gupta, K. M. Gupta,( 2013) "Novel Applications of Functionally Graded Nano, Optoelectronic and Thermoelectric Materials", *Int. J. of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 1, 221-224.
- [18]: Jamaludin, S. N. S., Mustapha, F., Nuruzzman, D. M., & Shah Nor Basri. (2013). A review on the fabrication techniques of functionally graded ceramic-metallic materials in advanced composites. *Scientific Research and Essays*, 8(21), 828–840.
- [19]: Rajan, T. P. D., & Pai, B. C. (2009). Development in manufacturing process of functionally graded materials. *International journal of advanced engineering applications*.
- [20]: Naebe, M., Shirvanimoghaddam, K. (2016) ,"Functionally graded materials: A review of fabrication and properties" , *Applied Materials Today* 5 223–245
- [21]: Watari F., Yokoyama A., Matsuno H., Miyao R., Uo M., Kawasaki T., Omori M., and Hirai T. (2001), "Fabrication of functionally graded implant and its biocompatibility," *functionally graded materials in the 21st century: a workshop on trends and forecasts*. Boston, Kluwer Academic, , pp. 187–190.
- [22]: Groves, J. F. and Wadley H. N. G. (1997) "Functionally graded materials synthesis via low vacuum directed vapor deposition". *Composites Parts B* 28B, 57-69.
- [23]: Choy, K.L. (2003) "Chemical vapour deposition of coatings", *Prog. Mater. Sci.* 48, (257–170).
- [24]: Proner A., (1999). "Revêtement par projection thermique". *Techniques de l'ingénieur, M* 1645, 3-20.
- [25]: Dorfman, M. (2002), "Thermal spray processes", *Adv. Mater. Process.* 160 (10), 66–68.

## Références Bibliographiques

---

- [26]: Watanabe. Y , Inaguma. Y , Sato. H and Eri Miura-Fujiwara, (2009), "A Novel Fabrication Method for Functionally Graded Materials under Centrifugal Force: The Centrifugal Mixed-Powder Method", *Materials*, 2, 2510-2525.
- [27]: Zhu K., Wang H., Qiu J., Luo J., and Ji H.,( 2011). "Fabrication of 0.655Pb(Mg<sub>1</sub>/3Nb<sub>2</sub>/3)O<sub>3</sub>-0.345PbTiO<sub>3</sub> functionally graded piezoelectric actuator by tape casting", *J Electro ceram.* , vol.27, pp.197–202.
- [28]: Chartier, T. and Boch, P.( 2001) "Mecanique et Ingenierie des materiaux, Materiaux et processus ceramiques", *Hermes Science Publications*.
- [29]: Besra, L. , Liu, M. (2007) "A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD)", *Prog. Mater. Sci.* 52 (1), 1–61.
- [30]: Put S., Vleugels J., Van Der Biest O., (2003), "Gradient profile prediction in functionally graded materials processed by electrophoretic deposition", *Acta Materialia* 51 6303–6317.
- [31]: Katayama, T., Sukenaga, S., Saito, N., Kagata, H. and Nakashima, K. ( 2011) "Fabrication of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-W Functionally Graded Materials by Slip casting Method", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 18.
- [32]: Souza F., Mansur H.S. (2004), "Production and characterization of ceramic pieces obtained by slip casting using powder wastes" , *Journal of Materials Processing Technology* 145 14–20.
- [33]: Shishkovsky I., Missemmer F., Smurov I., ( 2012 )," Direct metal deposition of functional graded structures in Ti-Al system", *Physics Procedia* 39 382 – 391.
- [34]: Sobczak J.J., Drenchev L. (2013), "Metallic functionally graded materials: a specific class of advanced composites", *J. Mater. Sci. Technol.* 29 (4), 297–316.
- [35]: Kieback B., Neubrand A., Riedel H. (2003), "Processing techniques for functionally graded materials". *Materials Science and Engineering A362* ,81–105.
- [36]: Bao., G. , Wang, L.( 1995) "Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings", *Int. J; Solids Structures*; 32 (19): 2853–2871.
- [37]: Chi . Shyang-ho., Chung Yen-Ling, (2003) "Cracking in coating-substrate composites of multi-layered and sigmoid FGM coatings". *Engineering Fracture Mechanics*; 70 (10), 1227–1243,
- [38]: Delale F, Erdogan F.( 1983), "The crack problem for a non homogeneous plane". *ASME JAppl Mech*;50:609–14.
- [39]: Mori T, Tanaka K.( 1973) "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions". *Acta Metall*; 21(5):571e4.

## Références Bibliographiques

---

- [40]: Benveniste Y.(1987) "A new approach to the application of Morie Tanaka's theory in composite materials". *Mech Mater*;6(2):147e57.
- [41]: Yang J, Liew KM, Kitipornchai S.( 2005) "Stochastic analysis of compositionally graded plates with system randomness under static loading". *Int J Mech Sci*;47(10):1519–41.
- [42]: Kitipornchai S., Yang J., Liew K.M. (2006). "Random vibration of the functionally graded laminates in thermal environments". *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 195 ,1075-1095.
- [43] (a): F.L. Chen, X. He, H.M. Yin, Manufacture and multi-physical characterization of aluminum/high-density polyethylene functionally graded materials for green energy building envelope applications, *Energy and Buildings* 116 (2016) 307–317.
- [44] (b): Fangliang Chen, Huiming Yin , Fabrication and laboratory-based performance testing of a building-integrated photovoltaic-thermal roofing panel, *Applied Energy* 177 (2016) 271–284
- [45]: H.M. Yin a,†, D.J. Yang a, G. Kelly b, J. Garant, Design and performance of a novel building integrated PV/thermal system for energy efficiency of buildings , *Solar Energy* 87 (2013) 184–195.
- [46]: Qiliang Lin, Fangliang Chen †, Huiming Yin, Experimental and theoretical investigation of the thermo-mechanical deformation of a functionally graded panel, *Engineering Structures* 138 (2017) 17–26
- [47]: Erdogan Madenci & Ibrahim Guven, *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*, Second Edition, Springer International Publishing 2015.
- [48]: ANSYS Mechanical APDL Element Reference, Release 15.0, November 2013